

# Energie für den Verkehr

Gert v. Kortzfleisch, Alfred Voss

Eine zusammengefaßte Darstellung der  
Ergebnisse einer systemanalytischen  
Untersuchung der langfristigen  
Perspektiven des Verkehrssektors und  
seiner Versorgung mit Energie

erstellt im Auftrag und mit Unterstützung  
der Forschungsvereinigung Automobil-  
technik e. V. vom Industrieseminar der  
Universität Mannheim (ISM) und der  
Programmgruppe Systemforschung und  
Technologische Entwicklung (STE) der  
Kernforschungsanlage Jülich

Bearbeiter:

K. Bellmann, Th. Brenner, G. Eickhoff,  
G. v. Kortzfleisch, W. Mende,  
K. Schmitz, D. Sievert, W. Terhorst,  
A. Voss

Schriftenreihe des Verbandes  
der Automobilindustrie e. V. (VDA) Nr. 42

**Copyright 1984 by**  
Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA)  
Westendstraße 61 · 6000 Frankfurt am Main 1

**Gesamtherstellung:**  
Druckerei Henrich  
Rheinlandstraße 62, 6000 Frankfurt/M.-Schwanheim

# Inhaltsverzeichnis

Seite

Vorwort	7
Vorbemerkung . . . . .	9
1. Ziele und Ergebnisse – Eine Zusammenfassung – . . . . .	11
2. Der systemanalytische Ansatz . . . . .	16
3. Drei Szenarien: Skizzen alternativer Zukunftsentwicklungen . .	21
4. Soziodemographische und sozioökonomische Entwicklungen .	28
5. Verkehrswirtschaftliche Entwicklungen . . . . .	35
6. Energienachfrage – Wachstum oder Rückgang? . . . . .	44
7. Der Kraftstoffmarkt vor einer Wende . . . . .	59
8. Strukturwandel in der Energiewirtschaft . . . . .	80

## Anhänge

A Mitglieder des projektbegleitenden Arbeitskreises 16 „Energie“ der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) . . . . .	86
B Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten . . . . .	87
C Ausgewählte Literatur . . . . .	88
D Beschreibung der verwendeten Modelle . . . . .	91

## **Vorwort**

Die vorliegende Untersuchung des Industrieseminars der Universität Mannheim und der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung der Kernforschungsanlage Jülich zur Energienachfrage des Verkehrssektors bis zum Jahr 2010 entstand im Auftrage der Forschungsgemeinschaft Automobiltechnik (FAT). Ihre Veröffentlichung in der Schriftenreihe des VDA in einer Zeit tendenziell eher sinkender Rohölpreise mag die Bedeutung unterstreichen, die man in der Automobilindustrie Fragen der langfristigen Energieversorgung auch während vorübergehender Schönwetter-Perioden am Welterdölmarkt beimißt. Die Automobilindustrie muß in langen Zeiträumen planen und darf sich durch die derzeit entspannte Versorgungslage nicht dazu verleiten lassen, in ihren heute schon auf die Jahrhundertwende zielenden Anstrengungen nachzulassen, den Kraftstoffverbrauch von Automobilen weiter zu verringern.

Die vorliegende Untersuchung ist nicht als eine Prognose zu verstehen, sie stellt vielmehr eine Modellrechnung mit mehreren Varianten dar. Dies relativiert ihre Aussage. Sie basiert auf dem Wissensstand der Jahre 1979/80. Dies mag als Nachteil empfunden werden. Das Verdienst der Untersuchung liegt jedoch weniger in ihren quantitativen Aussagen als in dem Versuch einer systemanalytischen Durchdringung der für den künftigen Energiebedarf bestimmenden Faktoren. In dieser Richtung liefert die Arbeit wertvolle Denkanstöße.

Frankfurt am Main, im März 1984

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E. V. (VDA)

## **Vorbemerkung**

**Eine jederzeit ausreichende und langfristig gesicherte Energieversorgung zu angemessenen Preisen ist ebenso wie ein leistungsfähiges Verkehrssystem eine der wesentlichen Voraussetzungen für einen modernen Industriestaat und die Selbstverwirklichung seiner Bürger.**

**Die spezifischen Eigenschaften und Vorteile der aus Erdöl gewonnenen Kraftstoffe Benzin und Dieselöl, wie leichte Speicherbarkeit, hohe Energiedichte und gute Transportierbarkeit haben zusammen mit den bis 1973 konkurrenzlosen Preisen dazu geführt, daß der Verkehrssektor heute nahezu vollständig vom Energieträger Erdöl abhängig ist. Vor dem Hintergrund der Abhängigkeit vom Öl und der begrenzten Reserven dieses Energieträgers gewinnt die Frage nach der zukünftigen Versorgung des Verkehrssektors mit Energie, einschließlich der nach Alternativen zu den ölstämmigen Kraftstoffen, besondere Bedeutung.**

**Die Anstrengungen zur Entwicklung von alternativen Antriebssystemen und Kraftstoffen sind in den letzten Jahren erheblich verstärkt worden, ohne daß einem der neuen Konzepte schon der Durchbruch gelungen wäre. Technisch stehen heute eine Vielzahl von mehr oder weniger marktreifen Antriebssystemen und Kraftstoffen zur Verfügung, die Benzin und Dieselkraftstoff substituieren könnten. Ihre wirtschaftliche Bedeutung ist aber umstritten und zwar insbesondere, weil die zukünftigen Strukturen der Energieversorgung heute nicht klar erkennbar sind und der Verkehrssektor mit den anderen energieverbrauchenden Sektoren um die knapper werdenden konventionellen und die neuen Energieträger konkurriert.**

**Dieser Bericht faßt die wesentlichen Ergebnisse einer umfangreichen, systemanalytischen Untersuchung über die zukünftigen Perspektiven des Verkehrssektors und seiner Versorgung mit Energie zusammen. Dabei ging es nicht darum, den vielen Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Verkehrssektors und der Energieversorgung eine weitere hinzuzufügen. Es wird der Versuch unternommen, aufbauend auf einer Erfassung der komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen des Systems „Wirtschaft-Energie-Verkehr“ und unter expliziter Berücksichtigung der vielfältigen Unsicherheiten, z. B. hinsichtlich der Ölpreisentwicklung, denkbare und plausible Zukünfte systematisch zu analysieren, um daraus Informationen und Hilfen für heute anstehende Entscheidungen in der Automobilindustrie und in der Mineralölindustrie abzuleiten. Dabei sollten insbesondere robuste Entwicklungstendenzen für den Verkehrssektor und seine Versorgung mit Energie identifiziert werden, worunter solche Entwicklungen zu verstehen sind, die in einem weiten Umfang unabhängig von der heute nur mit großen Unsicherheiten abschätzbaren Entwicklung wichtiger Bestimmungsfaktoren des Verkehrssektors sind, z. B. des Wirtschaftswachstums oder der Energiepreise.**

Vor diesem Hintergrund sind auch die Zahlenwerte einzelner Resultate, z. B. des Pkw- oder des Methanolfahrzeugbestandes im Jahre 2010, von weitaus geringerer Bedeutung als die gemeinsamen Entwicklungstendenzen, die sich nach den in dieser Untersuchung zugrundegelegten Szenarien errechnen.

Die Ergebnisse dieser systemanalytischen Untersuchung sind nicht als Prognose mißzuverstehen, sondern vor dem Hintergrund der gemachten Annahmen zu interpretieren und zu werten. Neue Erkenntnisse, die z. B. im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Automobiltechnik gewonnen werden, erfordern eine entsprechende Modifikation der Annahmen und Daten und eine Analyse ihrer Auswirkungen auf die Ergebnisse. In diesem Sinne bedürfen Untersuchungen, wie die hier durchgeführte, einer stetigen Weiterentwicklung und Aktualisierung.

Um die komplexen und sich wechselseitig beeinflussenden Entwicklungen zwischen der Wirtschaft, der Energieversorgung und dem Verkehrssektor quantitativ und konsistent zu analysieren, wurde ein umfangreiches EDV-gestütztes Modellsystem weiterentwickelt, das die technischen und ökonomischen Zusammenhänge des Systems „Wirtschaft – Energie – Verkehr“ beschreibt. Wie jedes andere Modell ist auch das im Rahmen dieser Untersuchung benutzte Modell ein vereinfachtes Abbild der Realität und in Teilsektoren problemspezifisch noch erweiterungsfähig. Es betrachtet den Verkehrsbereich als integralen Teil des Wirtschafts- und Energieversorgungssystems, also aus einem volkswirtschaftlichen Blickwinkel. Dies erlaubt natürlich nicht die Berücksichtigung von Detailspekten, die z. B. aus der spezifischen Sicht einzelner Unternehmen für die Einführung neuer Kraftstoffe von Bedeutung sein könnten. Dennoch können die mit Hilfe des Modells durchgeführten Analysen, wenn sie als Ausleuchten möglicher Entwicklungen des Verkehrssektors und seiner Versorgung mit Energie interpretiert werden, durchaus konkrete Ansatzpunkte für strategische Unternehmensentscheidungen liefern.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen mußten sich wegen der begrenzten Zeit auf einige wenige wichtige Problembereiche und Fragen in Zusammenhang mit der Energieversorgung im Verkehrsbereich beschränken. Individuellen Detaillierungen und Erweiterungen sind denkbar und ohne weiteres möglich.

# **Kapitel 1: Ziele und Ergebnisse – Eine Zusammenfassung**

Im folgenden werden die Ziele und wesentlichen Ergebnisse des Projektes „Energie für den Verkehr“ dargestellt. Dies am Anfang eines Berichtes zu tun kommt dem eiligen Leser entgegen, erlaubt es aber nicht, die Ergebnisse aus dem Kontext der notwendigerweise zu treffenden Annahmen und des methodischen Ansatzes zu verstehen und bewerten zu können. Aus diesem Grund wäre es für das Verständnis und die Einordnung der Untersuchungsergebnisse sinnvoll, nach dem Studium der nachfolgenden Kapitel auf die Ergebnisbeschreibung in diesem Kapitel noch einmal zurückzukommen.

## **Forschungsziele**

Primäres Ziel des Projektes „Energie für den Verkehr“ ist es, die langfristigen Energieversorgungsperspektiven der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2010 zu untersuchen, wobei den Entwicklungen im Verkehrssektor besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Im Sinne einer systemanalytischen Betrachtungsweise war dabei der Verkehrssektor als integraler Bestandteil des Systems „Wirtschaft-Energie-Verkehr“ zu erfassen, um die wechselseitigen Beeinflussungen von Entwicklungen im Verkehrssektor auf die Wirtschaft und Energieversorgung und umgekehrt explizit zu berücksichtigen. Erstmals wurde bei einer systemanalytischen Untersuchung über die langfristige Energieversorgung des Verkehrs ein Optimierungskriterium zugrundegelegt, das die Gesamtkosten der Kette Primärenergie–Energieumwandlung–Endbenutzertechnologie für den gesamten Betrachtungszeitraum minimiert. Abgeleitet aus dieser generellen Zielsetzung ergaben sich die folgenden Untersuchungsschwerpunkte:

- Analyse und Quantifizierung unterschiedlicher gesamtwirtschaftlicher Entwicklungen zur Ableitung der Verkehrsbedarfsentwicklung
- Projizieren der Nachfrage nach Verkehrsleistungen, insbesondere nach Straßenverkehrsleistungen, wobei der Individualverkehr und der Kollektivverkehr sowie der Personen- und der Güterverkehr zu unterscheiden sind.
- Untersuchung der alternativen Deckungsmöglichkeiten der Energienachfrage in der Bundesrepublik Deutschland, unter besonderer Berücksichtigung der Unsicherheiten bezüglich der Preisentwicklung und Verfügbarkeit von zu importierenden Primärenergieträgern.
- Untersuchung der Perspektiven verschiedener Antriebssysteme einschließlich alternativer Kraftstoffe für den Verkehrssektor, im Kontext der energiewirtschaftlichen Entwicklungstendenzen.

Es ist ausdrücklich nicht Ziel des Projektes, der Vielzahl von vorhandenen Prognosen zur Wirtschaftsentwicklung oder zur Entwicklung des Verkehrs- und Energiesektors eine neue hinzuzufügen, sondern es sollen aus einer systematischen Untersuchung denkbarer und plausibler Entwicklungen des

Systems „Wirtschaft-Energie-Verkehr“ und durch ein besseres Verständnis seiner komplexen Interdependenzen Informationen und Hilfen erarbeitet werden, die für heute in der Automobilwirtschaft und Energiewirtschaft anstehende strategische Entscheidungen von Nutzen sind. In diesem Sinne sind die in den folgenden Kapiteln genannten zukunftsbezogenen Zahlenwerte z. B. für die Bruttosozialprodukte, den Pkw-Bestand, den Ölverbrauch usw. auch nicht als Prognosen im eigentlichen Sinn des Wortes aufzufassen.

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.

Das *Referenzszenario* ist durch die Fortsetzung der heute erkennbaren ökonomischen und technischen Trends charakterisiert. Das *Prosperitätsszenario* basiert auf der Grundannahme, daß aufbauend auf einer konstruktiven Grundstimmung und durch das Wirksamwerden neuer Basisinnovationen ein dauerhafter wirtschaftlicher Aufschwung erzielt wird. Im Vergleich dazu ist das *Restriktionsszenario* durch einen Wandel gesellschaftlicher Grundvorstellungen und ökonomischer Verhaltensweisen gekennzeichnet, die sich in einem geringeren materiellen Anspruchsniveau und einer stärkeren Betonung immaterieller Werte äußern.

Um bei dem Entwurf der alternativen Szenarien die komplexen und vielfältigen Strukturen und Interdependenzen des Systems „Wirtschaft-Energie-Verkehr“ quantitativ zu erfassen und um die Fülle der zu verarbeitenden Informationen und Daten zu bewältigen, wurde ein EDV-gestütztes Modellsystem entwickelt und eingesetzt.

### **Ergebnisse (Zusammenfassung)**

Der Versuch, die vielen Einzelergebnisse, die im Rahmen des Projektes „Energie für den Verkehr“ erarbeitet worden sind, zusammengefaßt und auf das Wesentliche reduziert darzustellen, kann vielen interessanten Einzelaspekten natürlich nicht Rechnung tragen. Darüber hinaus bleibt anzumerken, daß es eine Reihe von Aspekten gibt, die einer weiteren detaillierteren Analyse bedürfen, als sie im Rahmen der Untersuchungen möglich war. Dennoch lassen sich aus den Untersuchungsergebnissen die folgenden wesentlichen Schlußfolgerungen ziehen.

#### **● Weiterer Anstieg der Personenverkehrsnachfrage zu erwarten**

Die Entwicklung der Personenverkehrsleistung variiert in den drei Szenarien und zwar zwischen einer Stagnation und einem Zuwachs von fast 40% von 1980 bis 2010. Maßgeblich sind die szenarioabhängigen Annahmen zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung.



● **Autofahren wird auch in Zukunft erschwinglich bleiben**

Infolge von realen Preissteigerungen verschiedener Art und Veränderungen der Gebrauchsgewohnheiten der Autofahrer bis zum Jahre 2010 steigen die privaten Pkw-Aufwendungen für die Haltung und den Betrieb von Pkw absolut bis zu 70% im Prosperitätsfall oder sinken um etwa 10% im Szenario Restriktion. Der Anteil der Betriebskosten an den Gesamtaufwendungen für die private Pkw-Haltung wird dabei zunehmen. Da aber das private Einkommen in jedem der drei Szenarien schneller wächst als die privaten Pkw-Aufwendungen, wird einer weiteren Zunahme der Motorisierung durch steigende Betriebs- und Haltungskosten keine Grenze gesetzt.

● **Die Transportleistungen des Straßengüterverkehrs expandieren stärker als die gesamte Güterverkehrsleistung**

Die Vorteile des Lkw als Transportmittel für die Bedienung von Haus-zu-Haus sowie der von anderen Verkehrsmitteln nicht zu erreichenden Gebiete und die relativ günstige Entwicklung der volkswirtschaftlichen Sektoren, deren Güter vornehmlich auf der Straße transportiert werden, lassen die Leistungen des Straßengüterverkehrs – insbesondere in den Szenarien Referenz und Prosperität – überdurchschnittlich wachsen.

● **Der Kraftstoffmarkt steht mit zunehmender Realisierung technischer Optionen zur Energieeinsparung und einem wachsenden Anteil zum Benzin alternativen Energieträgern vor einer Wende**

Dieselmotorkraftstoff wird bei den durchgeführten Modellrechnungen zum wichtigsten Energieträger im Verkehrssektor. Diese Tendenz zeigt sich als sehr stabiles Ergebnis, das sich auch in Sensitivitätsrechnungen mit vergleichsweise geringen Rohölpreissteigerungen bestätigt. Der Verbrauch von Benzin als Ottokraftstoff ohne Beimischungen (z. B. Methanol) geht drastisch zurück. Der im Vergleich zum Diesel- oder Alkoholfahrzeug ungünstigere Wirkungsgrad im Pkw und der höhere Kapital- und Energieeinsatz für Konversion und Reforming im Raffineriebereich sowie steuerliche Nachteile gegenüber Diesel und LPG führen zur schwachen Position des Benzins. Dennoch bleibt Mineralöl der wichtigste Primärenergieträger für den Verkehr.

Methanol ist der einzige nicht ölgebundene Kraftstoff mit Aussicht auf wirtschaftliche Bedeutung. Bei den Annahmen über den Rohölpreis in den drei Szenarien wird Methanol zum zweitwichtigsten Energieträger im Verkehrssektor und hauptsächlich auf der Basis inländischer Kohleveredlung bereitgestellt. Allerdings bleibt für die Erzeugung von Methanol aus Kohle die heizwertbezogene Relation zwischen dem Kohle- und Ölpreis ein wichtiges Datum. So erweist sich z. B. bei den moderaten Ölpreissteigerungen und einer Kohle-Ölpreisparität von etwa 70%, wie sie in der Sensitivitätsrechnung zum Referenzszenario <sup>1)</sup> unterstellt worden ist, die Methanolerzeugung aus Kohle als nicht wirtschaftlich.

---

<sup>1)</sup> Definition der Sensitivitätsrechnung zum Referenzszenario, siehe Kap. 3.

Flüssiggas (LPG) wird zwar einen wachsenden, aber nicht über 10% hinausgehenden Beitrag zur Deckung der Pkw-Kraftstoffnachfrage leisten. Die Bereitschaft der Mineralölindustrie zu den notwendigen Investitionen in die Infrastruktur einer LPG-Versorgungskette, der günstige Energieverbrauch LPG-optimierter Fahrzeuge, Steuervorteile und eine in Relation zum Benzin günstige Preisgestaltung schaffen die Voraussetzungen dazu.

Pkw-Antriebssysteme und entsprechende Kraftstoffe auf der Basis von Wasserstoff, komprimiertem Erdgas (CNG), Äthanol und elektrischem Strom haben sich nicht als ökonomische Alternativen innerhalb des Betrachtungszeitraums erwiesen.

- **Ein verstärkter Ausbau von Konversionsanlagen erscheint energiewirtschaftlich nicht notwendig**

Die Entwicklungen im Raffineriebereich sind durch zum Teil drastische Rückgänge des Rohöleinsatzes gekennzeichnet. Zusammen mit dem in allen Szenarien einheitlichen Trend in Richtung auf eine wachsende Verwendung von Dieseldieselkraftstoff im Verkehrsbereich folgt daraus, daß eine verstärkte Konversion von schweren Mineralölprodukten zu Benzin langfristig keine energiewirtschaftlich sinnvolle Strategie darstellt.

- **Marktchancen für Methanol und Gas aus Kohle bestehen im Falle erheblicher Ölpreissteigerungen**

Inwieweit die Kohleveredlung für die zukünftige Energieversorgung unseres Landes von Bedeutung sein wird, hängt von der Preisdifferenz zwischen Öl und Kohle ab. Bei der Veredlung von Kohle dürften die Kohlevergasung und Methanolerzeugung im Vordergrund stehen, da für Kohlebenzin wie für konventionelles Benzin Nutzungsgradnachteile im Motor gegenüber Methanol bestehen.

- **Die sparsamere und rationellere Energieverwendung bewirkt eine deutliche Entkopplung von Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum**

Das Spektrum der Primärenergieverbrauchsentwicklung reicht von einer annähernden Stagnation im Szenario Restriktion bis zu einer Steigerung um fast 50% bis zum Jahre 2010 im Szenario Prosperität. Die bei weiterem Anstieg der Energiepreise verstärkten Anstrengungen zu einer rationelleren Energienutzung lassen den Primärenergieverbrauch deutlich langsamer als das Bruttosozialprodukt anwachsen.

- **Mineralöl auf dem Rückzug**

In allen Szenarien ist der Mineralölverbrauch rückläufig. Steinkohle und Kernenergie dagegen weiten ihren Versorgungsbeitrag zum Teil erheblich aus. Hohe Wirtschaftswachstumsraten lassen sich bei forcierter Ölsubstitution nur durch einen stärkeren Rückgriff auf Kohle und Kernenergie absichern.

- **Die Gefahr von Fehlentscheidungen ist angesichts der sich abzeichnenden starken Strukturveränderungen im Verkehrs- und Mineralölbereich erheblich**

Ein wichtiges, vielleicht sogar das wichtigste Resultat der Untersuchungen ist die in den Modellrechnungen deutlich gewordene Tatsache, daß die Entwicklungen im Verkehrsbereich und der Mineralölverarbeitung eng miteinander verzahnt sind. Die Entscheidungen der Mineralölwirtschaft über ihre Kapazitäten zur Bereitstellung von Kraftstoffen und die Entscheidungen der Automobilindustrie über die am Markt anzubietenden Antriebssysteme bedürfen deshalb einer engen Abstimmung. Dies gilt auch für die steuerpolitischen Maßnahmen im Bereich der Energie- und Verkehrswirtschaft. Klare steuerliche Rahmenbedingungen, die sich primär an den langfristigen energiewirtschaftlichen Entwicklungsnotwendigkeiten orientieren, sind erforderlich, um in der Energiewirtschaft und Automobilindustrie Fehlinvestitionen zu vermeiden. Systematische, der komplexen Problematik gerecht werdende Zukunftsanalysen können dazu beitragen, daß der notwendige Dialog zwischen den Verantwortlichen in Politik und Wirtschaft auf einer rationalen Ebene geführt werden kann.

## **Kapitel 2: Der systemanalytische Ansatz**

Die Vielzahl der Einflußfaktoren und der Unsicherheiten, die die Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs, sowie die Nachfrage und Verfügbarkeit der verschiedenen Energieträger beeinflussen, erfordern den Einsatz systemanalytischer Methoden und die quantitative Beschreibung alternativer künftiger Entwicklungen in Form von in sich konsistenten Szenarien. Dieses Kapitel beschreibt, wie und mit welchen methodischen Ansätzen im Rahmen des Projektes „Energie für den Verkehr“ gearbeitet wurde.

Die heute gelegentlich zu hörende Feststellung, daß alles mit allem verknüpft ist oder daß alles von allem abhängt, ist sicher eine Übertreibung, aber sie weist doch zu Recht darauf hin, daß die Komplexität der Probleme mit denen sich die Menschheit heute, insbesondere in den modernen Industriegesellschaften konfrontiert sieht, innerhalb weniger Jahrzehnte dramatisch zugenommen hat. Das Energieproblem ist ein wohlbekanntes Beispiel für diese Entwicklung.

Auch der Verkehrsbereich ist von dieser Entwicklung nicht verschont geblieben, so daß heute die veränderten und neuen Anforderungen an das Verkehrssystem der Zukunft ganz wesentlich auch von Erfordernissen, Sachzwängen und Entwicklungen in Bereichen außerhalb des eigentlichen Verkehrssystems mitbestimmt werden. Ja, wesentliche Probleme, mit denen heute die Verkehrswirtschaft, die Fahrzeugindustrie oder die Verkehrspolitik befaßt sind, beruhen gerade auf den vielfältigen Verknüpfungen des Verkehrssystems mit der Umwelt, dem Energie-, Wirtschafts- und Gesellschaftssystem. Aus dieser Erkenntnis folgt, daß Problemlösungsvorschläge und -strategien nur durch eine ganzheitliche d. h. die Interdependenzen des Verkehrssystems mit anderen Systemen erfassende Analyse erarbeitet werden können.

So z. B. ist die Frage nach der zukünftigen Versorgung des Verkehrssektors mit Energie nicht zu beantworten, ohne eine Gesamtbetrachtung der Nachfrage nach Energie in den anderen volkswirtschaftlichen Sektoren und der Gewinnungs-, Import- und Umwandlungsmöglichkeiten der verschiedenen Energieträger. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der nicht nur im Verkehrsbereich die Situation des sog. Entscheidungsträgers kennzeichnet, ist der der Unsicherheit. Es sei hier beispielhaft nur die Unsicherheit hinsichtlich der wirtschaftlichen Entwicklung und der Energiepreise angesprochen, beides Größen, die einen wesentlichen Einfluß auf die Entwicklung im Verkehrsbereich haben. Ausgehend von diesem Sachverhalt, erscheint es als ein wenig sinnvolles Unterfangen, den Versuch zu unternehmen, die Zukunft im eigentlichen Sinne des Wortes prognostizieren zu wollen, da auch eine noch so intensive Beschäftigung mit der Zukunft die bestehenden Unsicherheiten nicht beseitigen kann.

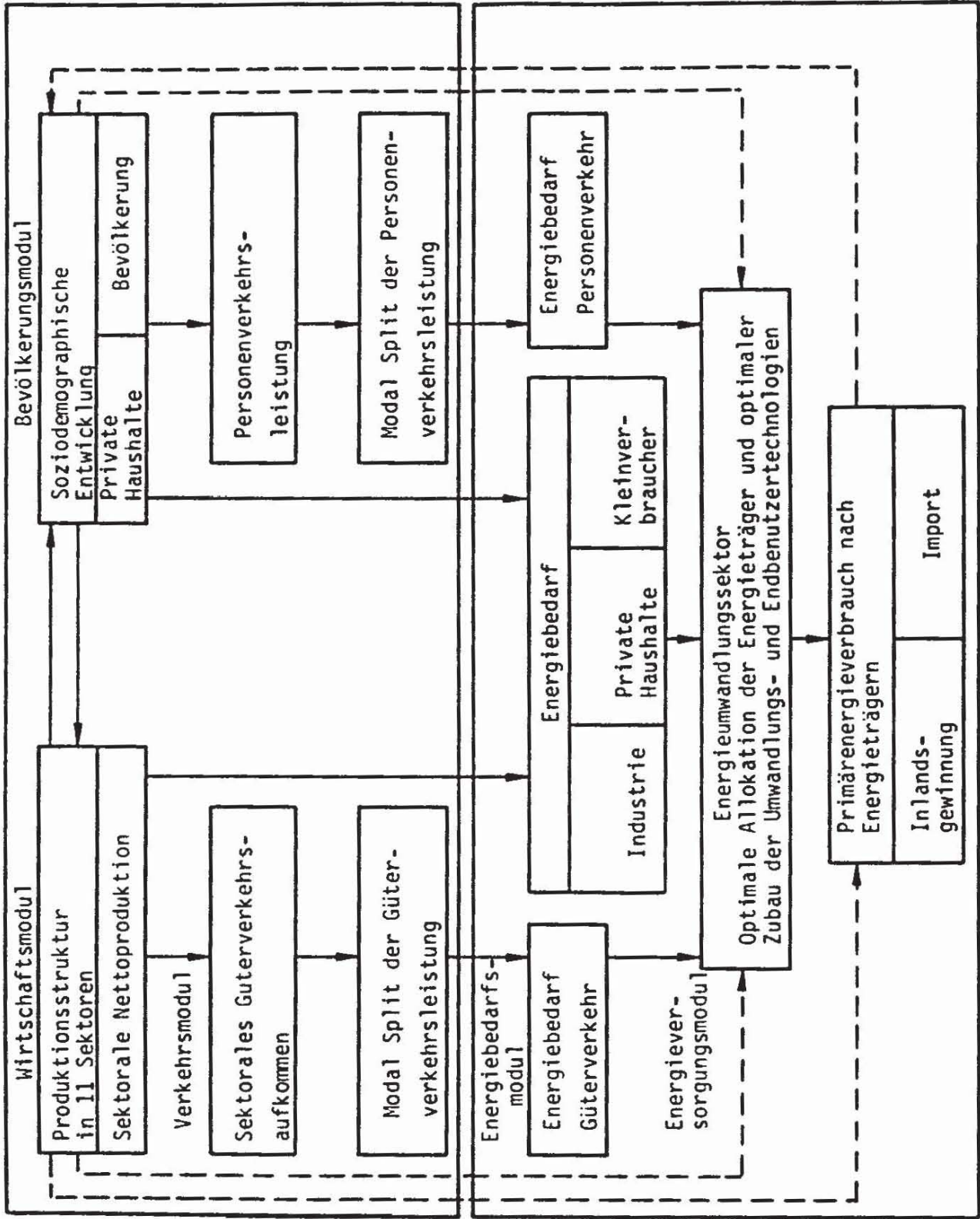
Das diesen Umständen angemessene Ziel einer Beschäftigung mit der Zukunft kann nur darin bestehen, denkbare Entwicklungen systematisch zu analysieren, ihre Konsequenzen aufzuzeigen, um daraus Rückschlüsse auf die heute zu treffenden Entscheidungen zu ziehen. Im Unterschied zu Prognosen soll eine derartige Beschäftigung mit der Zukunft als „systematische Zukunftsanalyse“ bezeichnet werden. Sie hat, was noch einmal deutlich herausgestellt werden soll, nicht das Ziel, z. B. herauszufinden, wieviel methanolgetriebene Pkw im Jahre 2000 auf den Straßen fahren werden oder wieviel Öl im Jahre 2010 in der Bundesrepublik noch verbraucht wird, sondern sie will Informationen und Erkenntnisse über mögliche Zukunftsentwicklungen gewinnen, die notwendig und hilfreich bei der Festlegung der heute zu treffenden Entscheidungen sind, und zwar unter dem Gesichtspunkt, daß diese Entscheidungen besser abgesichert sind. Übertragen auf eines der oben angesprochenen Beispiele heißt dies, Informationen zu erarbeiten, ob z. B. heute eine Entscheidung für eine großtechnische Einführung des Methanolfahrzeugs gefällt werden soll, welche Implikationen davon auf die Energiewirtschaft ausgehen werden, und wo die Unsicherheitsmomente für einen Methanoleinsatz im Verkehrsbereich liegen.

Im Rahmen dieser systemanalytischen Untersuchungen wird versucht, einmal durch das Entwerfen alternativer Szenarien und zum anderen durch die Variation von wichtigen Bestimmungsgrößen, Unsicherheiten zu erfassen und ihren Einfluß zu quantifizieren.

Um beim Entwurf alternativer Szenarien für zukünftige Entwicklungen des Systems „Wirtschaft-Energie-Verkehr“ die komplexen und vielfältigen Strukturen und Interdependenzen quantitativ zu erfassen und um die Fülle der zu verarbeitenden Informationen und Daten zu bewältigen, wurde ein EDV-gestütztes Modellsystem entwickelt und eingesetzt. Im Sinne der Zielsetzung der Untersuchungen beschreibt dieses Modellsystem die technischen und ökonomischen Aspekte des Systems Wirtschaft-Energie-Verkehr und stellt die für die quantitative Ausfüllung der Szenarien notwendige Konsistenz zwischen den technischen und wirtschaftlichen Größen sicher. Andere für die Entwicklung des Systems Wirtschaft-Energie-Verkehr wichtige Faktoren, wie z. B. gesellschaftliche Wertvorstellungen sowie energie- und verkehrspolitische Handlungsoptionen fließen als strategische Variable in die Szenari entwürfe ein.

Die wesentlichen Module des verwendeten Modellsystems sowie ihre Verknüpfung sind schematisch in Abb. 1 dargestellt.

Im Bevölkerungsmodul werden die sozio-demographischen Entwicklungen in der Bundesrepublik Deutschland beschrieben und damit wesentliche Bestimmungsgrößen für den Wirtschafts- und Verkehrsnachfragebereich quantifiziert, wie die Entwicklung der Gesamtbevölkerung, der motorisierungsrelevanten Bevölkerung oder die Zahl der Erwerbstätigen.



TEILMODELL

VOLKS- UND VERKEHRSWIRTSCHAFT

TEILMODELL

ENERGIEWIRTSCHAFT

Abb. 1: Struktur des Modellsystems

Die Produktionsstruktur der Volkswirtschaft der Bundesrepublik Deutschland wird im Wirtschaftsmodul durch ein institutionell abgegrenztes Input-Output-Modell mit zeitvarianten Input-Koeffizienten abgebildet.

Die sektoralen Nettoproduktionen und die Bevölkerungsentwicklung sind die wesentlichen Bestimmungsfaktoren zur Ermittlung der Güter- und Personenverkehrsleistung im Verkehrsmodul, in dem auch die Aufteilung auf die verschiedenen Verkehrsträger Straße, Schiene, Binnenschifffahrt und Luftverkehr vorgenommen wird.

Die Ergebnisse der volks- und verkehrswirtschaftlichen Module stellen Inputdaten für die energiewirtschaftlichen Module dar. So wird im Energiebedarfsmodul ausgehend von z. B. der Bevölkerungsentwicklung, den sektoralen Nettoproduktionen, dem verfügbaren Einkommen und den Transportleistungen des Personen- und Güterverkehrs die zeitliche Entwicklung der sektoralen Nutz- bzw. Endenergienachfragen ermittelt. In den Sektoren Haushalte und Kleinverbraucher wird dabei zwischen der Nutzenergie für die Raumheizung und Warmwasserbereitung sowie der Endenergie für die anderen Verwendungszwecke unterschieden. Für acht Industriesektoren wird die substituierbare und nichtsubstituierbare energieträgerspezifische Nachfrage bestimmt. Im Verkehrssektor sind die unter Berücksichtigung der zukünftigen Nutzungsgradverbesserungen sich ergebenden Nutzenergieverbräuche in vier Pkw-Klassen sowie bei den Lkw und Bussen Grundlage für die weiteren Rechnungen. Für alle übrigen Verkehrssysteme wird über zeitabhängig vorgegebene spezifische Energieverbräuche der Endenergiebedarf ermittelt.

Die so bestimmte zeitabhängige Nutz- bzw. Endenergienachfrage bildet dann den Input für ein dynamisches lineares Optimierungsmodell des gesamten Energiesystems. Dieses Modell stellt eine Abbildung des Energiesystems von der Gewinnung bzw. dem Import der verschiedenen Energieträger, ihrer Umwandlung z. B. in Raffinerien, Kohleveredlungsanlagen oder Kraftwerken, über den Transport zum Endverbraucher bis zur Nutzung in den Endverbrauchssektoren für verschiedene Verwendungszwecke dar. Es ermittelt den zeitabhängigen optimalen Ausbau der Energieumwandlungs- und Endbenutzertechnologien sowie die optimale Allokation der Energieträger und zwar so, daß die *Gesamtkosten über den gesamten Betrachtungszeitraum minimiert* werden. Dabei werden neben den Investitions- und Betriebskosten, sowie den Wirkungsgraden der verschiedenen Umwandlungs- und Endbenutzertechnologien (z. B. Kraftwerke, Kohlevergasungsanlagen, Raffinerien, Heizungssysteme und Pkw-Antriebssysteme) die Preise der Primärenergieträger und eine Vielzahl von technischen und energiewirtschaftlichen Randbedingungen berücksichtigt. Damit wurde eine integrale Betrachtung des Gesamtsystems vorgenommen. Das Resultat der Rechnungen ist eine aus volkswirtschaftlicher Sicht über den gesamten Betrachtungszeitraum optimale Allokation von Kapital und Energieträgern.

Diese äußerst knappe Beschreibung des verwendeten Modellsystems könnte den Eindruck erwecken, daß die Szenarienerstellung und -quantifizierung

durch eine einfache Vorwärtsrechnung mit den Modellen erreicht wird. Dies ist nicht so. Vielmehr werden im Wege der inhaltlichen Ausfüllung der Szenarien, die verschiedenen Modellmodule parallel und iterativ über eine Informationsrückkopplung betrieben. Die Ergebnisse der verschiedenen Teilmodelle werden kritisch analysiert und den Annahmen gegenübergestellt, um somit Konsistenz und Widerspruchsfreiheit zwischen den einzelnen Teilmodellergebnissen und den Grundannahmen herzustellen.



## **Kapitel 3: Drei Szenarien: Skizzen alternativer Zukunftsentwicklungen**

Die Ergebnisse einer jeden quantitativen Untersuchung der Zukunft werden wesentlich von den Annahmen und Hypothesen bestimmt, die in die Analysen einfließen. Dabei kommt natürlich den Annahmen eine besondere Bedeutung zu, die für das Verhalten und die Entwicklung der durch das Modell vereinfacht abgebildeten Realität dominant sind. Dieses Kapitel skizziert den gedanklichen Rahmen der alternativen Szenarioentwürfe des Systems „Wirtschaft-Energie-Verkehr“ und erläutert die Annahmen bezüglich wichtiger Einflußfaktoren.

Die Zukunft ist nicht prädestiniert und unabänderlich vorgegeben, sondern Zukunft ist in einem gewissen Ausmaß offen, sie kann gestaltet werden. Durch unsere Entscheidungen und Handlungen, aber auch durch Nichtaktionen gestalten wir bewußt oder unbewußt die Zukunft mit.

Die Möglichkeit, auf die Zukunft im Sinne einer Verbesserung der menschlichen Lebensbedingungen einzuwirken, bedingt aber auch eine mehr oder weniger große Unsicherheit wie einzelne Entwicklungen tatsächlich ablaufen werden und welche Ereignisse uns noch bevorstehen. Die hieraus resultierende Ungewißheit erschwert in vielen Bereichen der Wirtschaft und Politik Entscheidungen und macht, wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, das eigentliche Entscheidungsproblem aus.

Um im Rahmen der durchzuführenden Untersuchung denkbare Zukünfte des Verkehrssektors und seiner Versorgung mit Energie, sowie die Unsicherheit wichtiger Bestimmungsfaktoren zu erfassen, wurden drei Szenarien entworfen, die in sich konstante aber alternative Zukunftsentwicklungen für die wesentlichen, den Verkehrssektor beeinflussenden Faktoren umreißen.

Der Zeithorizont der Szenarien erstreckt sich dabei auf die nächsten 30 Jahre, also den Zeitraum von 1980 bis 2010. Diese langfristige Perspektive war notwendig, weil

- strukturelle Änderungen im Verkehrsbereich und der Energieversorgung in Zeiträumen von Jahrzehnten ablaufen, da die technischen Lebensdauern von Energieanlagen bei z. T. mehr als 20 Jahren und die mittlere Lebensdauer von Fahrzeugen bei etwa 10 Jahren liegen,
- die Markteinführung und Marktdurchdringung von neuen Antriebssystemen und Kraftstoffen einen Zeitraum von mindestens einem Jahrzehnt erfordert, ebenso wie
- die Entwicklung und Demonstration neuer Technologien.

**Tab. 1:  
Rahmenbedingungen der drei Szenarien**

	<b>Referenzszenario</b>	<b>Prospektivszenario</b>	<b>Restriktionsszenario</b>
<b>Grundtendenz:</b>	Fortsetzung der gegenwärtig erkennbaren langfristigen ökonomischen und technologischen Entwicklungen	Systeminterne Lösung der Probleme der modernen Industriegesellschaft Wirtschaftlicher Aufschwung ab etwa 1990 entsprechend der Theorie der langen Konjunkturwellen	Wandel der gesellschaftlichen Grundvorstellungen und der ökonomischen Verhaltensweisen in Richtung auf eine „tertiäre Zivilisation“
<b>Volkswirtschaft und Bevölkerung Wirtschaftsstruktur</b>	In etwa gleichbleibend	Ausweitung des sekundären Bereichs	Veränderungen des tertiären Bereichs, Betonung der Entwicklung von langlebigen Konsum- und Investitionsgütern
<b>Wirtschaftswachstum</b>	Mittleres Wirtschaftswachstum mit degressiv abnehmenden Wachstumsraten	Hohes Wirtschaftswachstum mit nach 1990 konstant hohen Wachstumsraten	Niedriges Wirtschaftswachstum mit stark degressiven Wachstumsraten
<b>Bevölkerung</b>	Abnahme um etwa 10 % bis 2010, Ausländeranteil etwa gleichbleibend	Abnahme um etwa 7 % aufgrund einer stärkeren Zuwanderung aus dem Ausland	Höhere Fertilität der deutschen Bevölkerung Abnahme der Wohnbevölkerung deshalb nur etwa 7 % bis 2010
<b>Energieversorgung</b>	Ansteigende Rohölpreise ab Ende dieses Jahrzehnts, die sich bis zur Jahrhundertwende etwa verdreifachen Begrenzter Ausbau der Kernenergie, keine Nutzung fortgeschrittener Reaktorkonzepte	Stark ansteigende Rohölpreise ab Ende der achtziger Jahre, mit einer Vervierfachung bis zum Jahre 2000 Keine politischen Beschränkungen beim Kernenergieausbau	Fortsetzung der starken Ölpreiserhöhung der vergangenen Jahre bis Mitte der 90er Jahre, danach Stabilisierung und leichter Rückgang Begrenzung des Kernenergieausbaus auf die in Bau befindlichen Kraftwerke
<b>Verkehr Personenverkehr</b>	Förderung des öffentlichen Personenverkehrs wie bisher	Öffentlicher und individueller Personenverkehr in ökonomischer Konkurrenz	Starke Umschichtung zugunsten des öffentlichen Personenverkehrs
<b>Güterverkehr</b>	Strukturelle Verschiebungen zugunsten des Straßenverkehrs	Strukturelle Verschiebungen zugunsten des Straßenverkehrs	Strukturelle Verschiebungen zugunsten von Schiene und Binnenschifffahrt

## Charakterisierung der drei Szenarien

Mit den drei Szenarien soll ein umfassendes und widerspruchsfreies Bild denkbarer Entwicklungen gezeichnet werden, die ein weites Spektrum der für den Verkehrssektor relevanten Einflußfaktoren und Entwicklungen aufspannen. Dabei sollen nicht die Strukturen und Entwicklungstendenzen der Vergangenheit fortgeschrieben werden, sondern die Szenarien sollen auch unterschiedliche gesellschaftspolitische und ökonomische Werthaltungen sowie die Unsicherheit wichtiger Einflußgrößen widerspiegeln.

Allen Szenarien gemeinsam ist die hypothetische Annahme, daß keine katastrophalen Ereignisse oder längeranhaltende Krisen eintreten. Insbesondere wird davon ausgegangen, daß

- keine weltweiten Handelshemmnisse aufgebaut werden, sondern daß die weltweite Arbeitsteilung und Kooperation sich fortentwickelt und ein funktionierender Welthandel erhalten bleibt,
- durch eine verstärkte Kooperation mit den Entwicklungsländern die Nord-Süd-Problematik, wenn nicht gelöst, so doch gemildert werden kann,
- der Welthandel bei den Energieträgern Öl, Erdgas, Kohle und Uran funktionsfähig bleibt,
- die demokratische an der sozialen Marktwirtschaft orientierte Grundordnung unserer Gesellschaft erhalten bleibt.

Eine zusammenfassende Übersicht über die wesentlichen Rahmenbedingungen und die drei Szenarien charakterisierenden Annahmen gibt die Tabelle 1.

Das *Referenzszenario* ist dadurch definiert, daß sich die gegenwärtig erkennbaren langfristigen ökonomischen und technologischen Entwicklungen fortsetzen.

Bei der Inlandsnachfrage werden für viele Konsum- und Produktionsgüter Sättigungstendenzen spürbar, die nur teilweise Folge der rückläufigen Bevölkerungsentwicklung sind. Zwar können auf einigen Teilgebieten noch erhebliche Fortschritte erfolgen, jedoch kommen – zum Teil mangels Finanzierbarkeit und gesellschaftspolitischer Durchsetzbarkeit – keine Basisinnovationen zum Durchbruch, die einen bedeutenden wirtschaftlichen Aufschwung bewirken und damit das Arbeitslosenproblem lösen könnten. Auch neue, marktgängige Produkte werden deshalb nicht die dämpfende Wirkung in bezug auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung kompensieren können.

Das Bedürfnis nach individueller und sozialer Selbstverwirklichung wächst stetig, und somit steigen die Ansprüche an die Freizeit, an die Ausbildung, an die Kommunikation und an die Bildung. Mehr und mehr wird öffentliche Mitsprache gefordert, so daß vor allem die Bereiche Technologie, Verkehr, Umweltschutz eine deutliche Politisierung erfahren. Eine wachstumsorientierte Technologiepolitik läßt sich deshalb nur unter Abstrichen durchsetzen.

Das Wirtschaftswachstum wird, auch wegen des Bevölkerungsrückganges, langfristig degressiv verlaufen. Gravierende Änderungen der Wirtschaftsstruktur werden nicht unterstellt.

Im Energiebereich wird sich der Strukturwandel trotz steigender Weltmarktpreise aufgrund politischer Eingriffe und gesellschaftspolitischer Hemmnisse nicht in dem ökonomisch wünschbaren und technologisch machbaren Umfang vollziehen. Dies trifft auch für den Ausbau der Kernenergie zu, der im begrenzten Umfang möglich ist, dabei wird unterstellt, daß fortgeschrittene Reaktorkonzepte, wie der Schnelle Brüter und der Hochtemperaturreaktor nicht zum Einsatz kommen.

Die Verkehrspolitik wird durch die Förderung des Ausbaues öffentlicher Verkehrssysteme in Ballungsgebieten und durch Subvention des öffentlichen Personenverkehrs, die zukünftigen Entwicklungen im Verkehrsbereich dergestalt beeinflussen, daß im Bereich des Personenverkehrs sich der in der Vergangenheit vollzogene Trend zur Ausweitung des Individualverkehrs nicht weiter fortsetzen wird. Beim Güterverkehr wird sich der Trend zur Ausweitung des Anteils des Straßengüterverkehrs, wenn auch verlangsamt, fortsetzen.

Die Einstellung zum Personenkraftwagen wird zunehmend rationaler, Prestigegründe treten in den Hintergrund. Die Kaufentscheidung erfolgt vielfach unter Kostengesichtspunkten, primär aufgrund des Vergleichs der Anschaffungs- sowie der Betriebs- und Unterhaltungskosten.

Das *Prosperitätsszenario* unterstellt, daß nach der Theorie der langen Konjunkturwellen ab etwa 1990 ein nachhaltiger wirtschaftlicher Aufschwung einsetzt. Wie in der Vergangenheit hat der Aufschwung seine Ursache im Wirksamwerden neuer Basisinnovation, wie z. B. der Mikroelektronik. Neue Technologien im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik, der Bio- und Gentechnik, der Prozeßsteuerung sowie die Lasertechnik, aber auch neue Werkstoffe (z. B. Keramik) kommen nach und nach zum Durchbruch. Die Nachfrage nach neuen, marktgängigen Konsum- und Produktionsgütern stimuliert das Wirtschaftswachstum sowie die industrielle Produktion, was zu einer Ausweitung des sekundären Bereichs am Bruttoinlandsprodukt führt.

Das hohe Wirtschaftswachstum erlaubt neben einer erheblichen Minderung des Arbeitslosenproblems gerade durch die schnelle Einführung neuer Technologien eine erhebliche Verbesserung der Umweltsituation. Die Wohnbevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland wird aufgrund einer stärkeren Zuwanderung aus dem Ausland nur um etwa 7% abnehmen.

Im Zuge des weltweiten wirtschaftlichen Aufschwungs ab etwa 1990 wird es trotz erheblicher Anstrengungen zu einer rationelleren Energienutzung weltweit jedoch zu einer erheblichen Energienachfragesteigerung kommen. Steigende Energiepreise, insbesondere Rohölpreise sind die Folge. Der Ausbau der Energieversorgung, insbesondere der Kernenergie, ist keiner politischen Beschränkung unterworfen.

Bis etwa 1990 dürfte bezüglich des Pkw die gleiche Einstellung wie im Referenzfall vorherrschen. Danach wird sich bei steigendem materiellen Wohlstand das Kaufverhalten deutlicher ändern. Breitere Käuferschichten wünschen eine stärkere Differenzierung des Pkw-Angebots, so daß hier ein „Weltauto“ kaum eine Chance hätte. Die Verlängerung der Lebensdauer von Pkw hat keine hohe Priorität. Das Erstfahrzeug muß vor allem für Beruf, Reise, Einkauf und Freizeit geeignet sein. Die Verkehrspolitik verzichtet zunehmend auf dirigistische Eingriffe. Öffentlicher und individueller Personenverkehr entwickeln sich in ökonomischer Konkurrenz zueinander. Im Güterverkehr wird sich der relative Anteil des Straßengüterverkehrs gegenüber heute erheblich erhöhen.

Das *Restriktionsszenario* ist durch einen Wandel der gesellschaftlichen Grundvorstellungen und der ökonomischen Verhaltensweisen in Richtung auf eine „tertiäre Zivilisation“ gekennzeichnet. Materielle Werte verlieren zunehmend an Bedeutung zugunsten eines Lebensstils und einer Lebensauffassung, die auf materiellen Wohlstand teilweise verzichtet und ökologischen Fragen, sowie der Naturbezogenheit und der Selbstverwirklichung in der Arbeit und Familie einen höheren Stellenwert zuweist, ohne daß dies industrie- und technologiefeindliche Züge annimmt.

Diese veränderten Wertvorstellungen sowie das reduzierte materielle Anspruchsniveau der Verbraucher führt zu einem relativ niedrigen Wirtschaftswachstum, das eine Lösung des Arbeitslosenproblems über die Ausweitung der Wirtschaftsaktivitäten nicht ermöglicht. Das gesteigerte Bedürfnis nach sozialer und individueller Selbstverwirklichung läßt die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen des tertiären Bereichs steigen. Kommunikation, Gesundheit, Erholung, Freizeit, Bildung usw. sind Bereiche, durch die die Ausweitung des Dienstleistungssektors getragen wird.

Bezüglich der Energiepreisentwicklung wird unterstellt, daß sich die drastischen Preissteigerungen des Leitenergieträgers Öl, die wir in den letzten Jahren erlebt haben, weiter fortsetzen, so daß sich die Rohölpreise bis zum Ende der 80er Jahre gegenüber heute verdoppeln werden. Diese Preissteigerungen führen über eine verstärkte Energieeinsparung im Zusammenwirken mit der moderaten Wirtschaftsentwicklung zu einem Nachfragerückgang, der in den 90er Jahren eine Stabilisierung des Rohölpreinsniveaus bewirkt. Der Ausbau der Kernenergie wird in diesem Szenario auf die heute im Bau und Betrieb befindlichen Kapazitäten begrenzt.

Staatliche Eingriffe im Bereich des Verkehrs nehmen infolge gesellschaftspolitischer Forderungen zu. Diese Eingriffe dienen generell der Förderung des Kollektivverkehrs und führen zu einem geringeren Anteil des Individualverkehrs an der Personenverkehrsleistung und im Güterverkehr zu strukturellen Verschiebungen zugunsten von Schiene und Binnenschifffahrt. Das Automobil verliert in diesem Szenario seine Eigenschaft als Prestigeobjekt. Es wird angenommen, daß ein ausgeprägtes Kosten- und Umweltbewußtsein zu einer stärkeren Bevorzugung von Automobilen kleinerer und mittlerer Größe führt.

## Steigende Weltmarktpreise für Primärenergie

Im Rahmen einer Untersuchung der langfristigen Perspektiven der Energieversorgung des Verkehrssektors kommt natürlich den Annahmen über die Entwicklung der Weltmarktpreise der Primärenergieträger eine ergebnisprägende Bedeutung zu. Dabei ist die absolute Höhe des Energiepreisniveaus insbesondere maßgebend für die Substitution von Energie durch Kapital, also die Höhe der Energieeinsparung oder die Wettbewerbssituation von kapitalintensiven Energietechnologien mit hohen Nutzungsgraden (z. B. Wärmepumpen gegenüber der konventionellen Heizung). Das relative Preisniveau der verschiedenen Primärenergieträger untereinander hingegen beeinflusst die Wahl der Versorgungsalternative z. B. die zwischen einem Benzin- und einem Methanolauto.

Genau wie die drei Szenarien alternative denkbare Zukünfte und die Unsicherheit bezüglich wichtiger Bestimmungsfaktoren für den Verkehrssektor umreißen, sollen auch die den Szenarien zugeordneten Energiepreisannahmen das Spektrum plausibler Energiepreisentwicklungen einfangen (und damit der Unsicherheit Rechnung tragen, die heute in bezug auf die Energiepreisentwicklung herrscht).

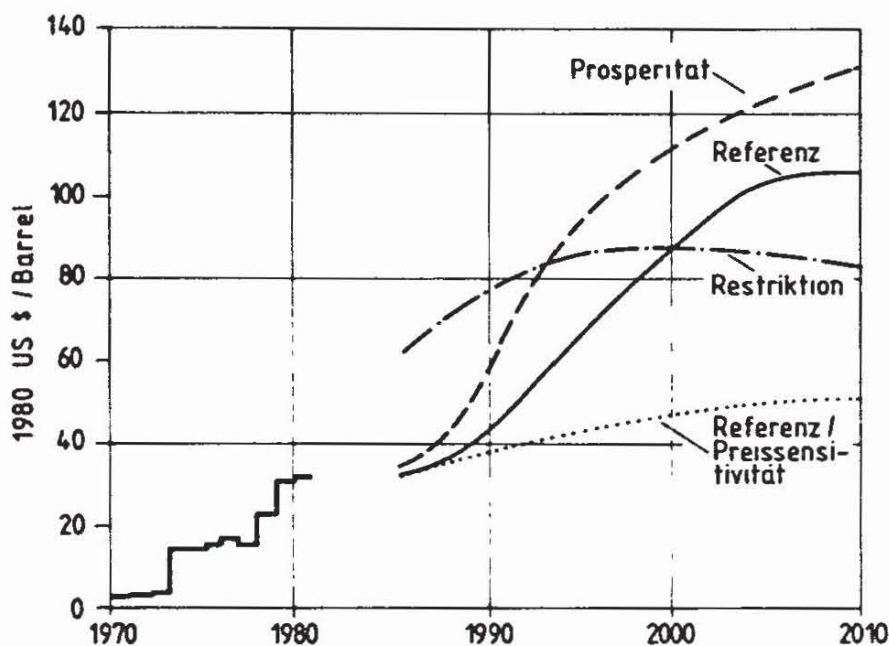
Aus diesem Grund wurde der Energiepreisentwicklung im *Referenzszenario* zusätzlich eine alternative, bewußt niedrige Energiepreisentwicklung gegenübergestellt, um die *Sensitivität* der Ergebnisse in bezug auf die Energiepreisannahmen zu ermitteln. Die den Szenarien zugrunde liegende Entwicklung der Ölpreise ist in Abb. 2 dargestellt.

In dem Referenzszenario und dem Prosperitätsszenario wird von stagnierenden Ölpreisen bis zur Mitte der 80er Jahre ausgegangen. Die im Zuge des wirtschaftlichen Aufschwungs wachsende Nachfrage bietet danach einen Preiserhöhungsspielraum, der in kurzer Zeit genutzt wird. So tritt infolge von Verknappungen bis zum Jahre 2000 eine Verdreifachung im Referenzfall, bzw. eine knappe Vervierfachung der Rohölpreise im Prosperitätsfall gegenüber Ende 1980 ein. Der Zeitraum nach dem Jahr 2000 ist zunehmend geprägt durch eine Begrenzung des Preisspielraums infolge des Einsatzes von Mineralölsubstituten.

Im Restriktionsszenario wird unterstellt, daß infolge politischer Faktoren sich die Preissteigerungen der 70er Jahre auch in der nächsten Dekade fortsetzen. Der Zwang zur Ölsubstitution wird dadurch erheblich verstärkt. Der langfristige Trend der Ölpreisentwicklung kippt schließlich infolge von Sättigungstendenzen und massiven Energieeinsparungen in den Industrieländern, so daß überzogene Preiserhöhungen langfristig über den Markt korrigiert werden.

Quasi als Kontrapunkt zu diesen Ölpreisentwicklungen wird in einem Preissensitivitätsfall zum Referenzszenario ein erheblich langsames Anwachsen

des Ölpreises unterstellt, der sich in diesem Fall bis zum Jahr 2010 nur um etwa mehr als 50% erhöht.



**Abb. 2: Entwicklung der Rohölpreise in \$<sub>80</sub>/bbl**

In allen drei Szenarien wird die „Entkopplung“ der Kohlepreise von dem gegenwärtigen Energiepreisführer Rohöl angenommen. Mittel- und langfristig dürften die Weltkohlemärkte deutliche Tendenzen zu Käufermärkten aufweisen, die vom stärkeren Einsatz der Kernenergie im Referenz- und Prosperitätsszenario gestützt werden. Die Verringerung des Wirtschaftswachstums und die Hinwendung zur Produktion von Dienstleistungen im Restriktionsszenario führen bei einem deutlich niedrigeren Weltkohlehandelsvolumen ebenfalls in die beschriebene Richtung. Aufgrund dieser Überlegungen wird unterstellt, daß in allen drei Szenarien der Kohlepreis sich im Trend kostenorientiert bildet, so daß der Preisabstand zwischen Öl und Kohle wächst.

Ein anderer Preisbildungsmechanismus wird in der Preissensitivitätsrechnung zum Referenzszenario unterstellt. Bei nur mäßigem Anstieg des Rohölpreises orientiert sich hier der Kohlepreis weitgehend an seinem energetischen Wert zu konkurrierenden Energieträgern.

Die Preisbildung für Erdgas auf den internationalen Märkten erfolgte in der Vergangenheit in starker Anlehnung an die Preise des Mineralöls oder gewisser Mineralölprodukten. In den Szenarien wird davon ausgegangen, daß dies auch in Zukunft der Fall sein wird.

In diesem Kapitel sind zwar nicht alle, aber alle wesentlichen Annahmen, die in die Modelluntersuchungen eingeflossen sind, beschrieben worden. Diese Annahmen sollten beim Lesen der in den nächsten Kapiteln beschriebenen Ergebnisse im Gedächtnis behalten werden, weil nur vor diesem Hintergrund die aus den numerischen Ergebnissen abgeleiteten Schlußfolgerungen zu beurteilen sind.

## **Kapitel 4: Soziodemographische und sozioökonomische Evolutionen**

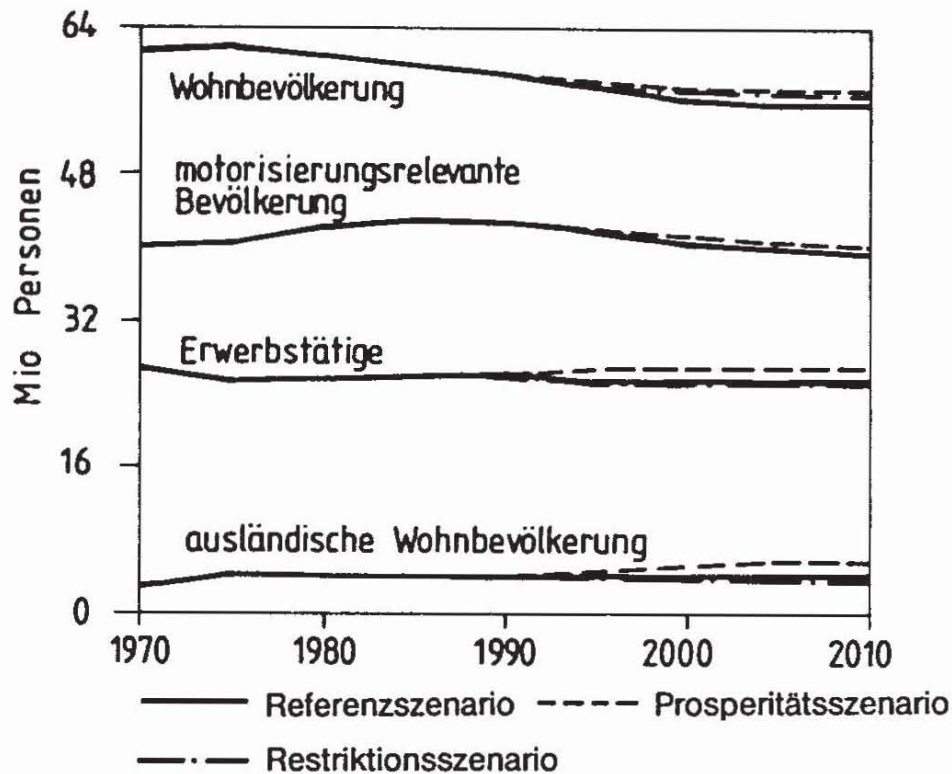
Jede Zukunftsbetrachtung erfordert zunächst eine Vergangenheitsanalyse, die im vorliegenden Projekt im Jahre 1970 beginnt und zur Darstellung bestehender Strukturen führt. Die Entwicklung der Determinanten von Industrie, Kleinverbrauchern und privaten Haushalten, die die Energienachfrage nach Quantität und Qualität bestimmen, erklärt sich aus dem Wandel der analysierten Strukturen und wird in den Modulen „Bevölkerung“ und „Wirtschaft“ des volkswirtschaftlichen Modells generiert. Mit einem Modell der Autohaltungskostenentwicklung werden die Aufwendungen für die Autohaltung eines motorisierten privaten Haushaltes abgeschätzt.

### **Bevölkerung**

Die natürliche Bevölkerungsentwicklung der Bundesrepublik Deutschland ist seit 1972 rückläufig. In den Jahren 1973 und 1974 konnte dies durch starke Zuwanderungsüberschüsse egalisiert werden. Seitdem ist aber auch der Migrationssaldo negativ und damit die gesamte Bevölkerungsentwicklung. Die szenariospezifischen Bevölkerungsentwicklungen sind in Abb. 3 dargestellt. Sie sind durch folgende Tendenzen gekennzeichnet:

- In den letzten Jahren hat ein sozialer Strukturierungsprozeß der Bundesrepublik Deutschland stattgefunden, der durch bewußte Planung der Familiengröße charakterisiert ist. Die Gründe hierfür sind die Anpassung ländlicher Lebensformen an städtische, die zunehmende Dominanz materieller Faktoren in allen gesellschaftlichen Bereichen, der Wandel der Stellung der Frau und nicht zuletzt die verbesserten Methoden zur Empfängnisverhütung. Die Tendenz zur Annäherung der Sterberate an die Geburtenrate kann als Zeichen für einen allmählichen Abschluß dieses Prozesses gesehen werden. Die ausländische Wohnbevölkerung der Bundesrepublik paßt sich in ihren sozialen, ökonomisch wirksamen Attitüden immer mehr denen der deutschen Bevölkerung an. Auch der negative Wanderungssaldo dürfte abnehmen, so daß nach dem Jahr 2000 die Bevölkerung sich zu stabilisieren beginnt. Aus diesen Annahmen resultiert im Referenzfall eine auf etwa 55 Mio. Einwohner abnehmende Wohnbevölkerung im Bereich der Bundesrepublik im Jahr 2010. Die Zahl der Ausländer nimmt zwar absolut ab, relativ erhöht sich deren Anteil aber bis auf 6,8%. Bis nach 1990 wird die Zahl der Erwerbstätigen noch zunehmen. Es kann erwartet werden, daß der Anteil der Einpersonenhaushalte an den Gesamthaushalten nicht größer, der Anteil der Vielpersonenhaushalte aber weiter deutlich kleiner wird. Weil außerdem die Haushalte der Ausländer sich denen der Deutschen anpassen, sinkt auch die durchschnittliche Haushaltsgröße in den nächsten 20 Jahren. Insgesamt muß bis zum Ende des Betrachtungszeitraums eine Abnahme der Zahl der privaten Haushalte um ca. 1 Mio. erwartet werden.





**Abb. 3: Szenarienbedingte Bandbreiten der demographischen Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2010**

- Die bereits in der Vergangenheit die demographische Entwicklung bestimmenden Tendenzen führen auch im Prosperitätsszenario zu einem Rückgang der deutschen Wohnbevölkerung. Daß die gesamte Wohnbevölkerung dennoch weniger stark zurückgeht als im Referenzszenario, nämlich auf etwa 56,8 Mio. Menschen, hat seine Ursache in der anhaltenden Zuwanderung von Ausländern, die durch die positive Wirtschafts- und Arbeitsmarktentwicklung begünstigt wird. Gegenüber heute erhöht sich die Zahl der Ausländer bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes um etwa 40%. Die Zahl der Erwerbstätigen stabilisiert sich gegen Ende dieses Jahrhunderts auf einem Niveau von über 26 Mio. Die Zahl der privaten Haushalte geht bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes nur geringfügig zurück, da sich Bevölkerungsentwicklung und Rückgang der durchschnittlichen Haushaltsgröße gegenseitig kompensieren.

- Aus der das Restriktionsszenario charakterisierenden gesellschaftlichen Grundeinstellung ist abzuleiten, daß die stärkere Orientierung an immateriellen Werten auch Rückwirkungen auf die demographische Entwicklung haben wird. Unterstützt wird diese Neuorientierung durch flankierende staatliche Maßnahmen wie Wohnraumbeschaffung, Kindergeld etc. Dadurch erfährt die Einstellung zur Familie eine Aufwertung, die sich in höheren Geburtenzahlen äußert. Dennoch erreicht gegen Ende des Betrachtungszeitraumes die Bevölkerungszahl nicht den für das Prosperitätsszenario ermittelten Wert, da im Restriktionsszenario mit einem geringeren Ausländeranteil (6%) gerechnet wird. Da die durchschnittliche Haushaltsgröße weniger stark rückläufig als in

den beiden anderen Szenarien sein wird, geht die Zahl der privaten Haushalte bis 2010 gegenüber heute um etwa 1 Mio. zurück.

Zur Ermittlung der Individualverkehrsleistung wurde in dieser Untersuchung die Entwicklung der motorisierungsrelevanten Bevölkerungsgruppen gesondert untersucht. Sie umfaßt definitionsgemäß die Personen zwischen 18 Jahren und 70 Jahren und folgt tendenziell der Entwicklung der Zahl der Erwerbstätigen.

So nimmt die motorisierungsrelevante Bevölkerung bis etwa 1990 bei abnehmender Wohnbevölkerung noch zu. Danach ist in allen Szenarien mit einer rückläufigen Entwicklung zu rechnen; die Unterschiede bleiben jedoch bis zum Projektionshorizont gering.

### **Binnenwirtschaft**

Die Wirtschaft der Bundesrepublik Deutschland ist auf ihren Binnenmärkten und auf ihren Auslandsmärkten vielfältig verflochten. Dieser Umstand ist bei Projektionen so weitgehend wie nötig zu berücksichtigen. Für die Analysen im Rahmen des Projektes „Energie für den Verkehr“ werden die Einflüsse externer Märkte innerhalb der verschiedenen Szenarien als exogene Randbedingungen erfaßt. Die binnenwirtschaftlichen Verflechtungen werden dagegen explizit modelliert. Dazu wird die gesamte Volkswirtschaft in 11 Sektoren unterteilt, deren Waren- und Dienstleistungsaustausche in Input-Output-Tabellen mit dynamisierten Koeffizienten erfaßt werden.

Das Bruttoinlandsprodukt wächst in den drei Szenarien sehr unterschiedlich (siehe Tab. 2). So liegen die durchschnittlichen gesamtwirtschaftlichen Wachstumsraten für den betrachteten Zeitraum zwischen 2,2%/a im Restriktionsszenario und 3,7%/a im Prosperitätsszenario. Im Referenzszenario nehmen die Wachstumsraten kontinuierlich ab und erreichen einen Durchschnittswert von 2,8%/a. Unterschiede in den Wachstumsraten der einzelnen Sektoren (Tab. 2) induzieren strukturelle Veränderungen der sektoralen Beiträge zum Bruttoinlandsprodukt. Das hat zur Folge, daß das Verhältnis Gewerbliche Bereiche (Sekundärsektor) zu Verbrauchernahe Bereiche (Tertiärsektor) im Referenzszenario nur leichte Verschiebungen in Richtung Dienstleistungsbereich zeigt. Unter den Bedingungen des Prosperitätsszenarios nimmt der Anteil der Verbrauchsnahen Bereiche am Bruttoinlandsprodukt gleichzeitig mit Einsetzen des industriellen Aufschwungs nach 1990 sogar noch ab. Erst im Szenario Restriktion vollzieht sich gemäß der Szenarienphilosophie ein bemerkenswerter Strukturwandel zugunsten des tertiären Bereichs.

Innerhalb der Gewerblichen Sektoren sind – zunächst unabhängig von den Szenarien – zwei Gruppen zu unterscheiden: Die Sektoren, die der ersten Gruppe zuzurechnen sind, erhöhen im Vergleich zu 1980 ihren Beitragsanteil zum Bruttoinlandsprodukt ständig, wenn auch je nach Sektor verschieden stark. Dagegen müssen die Sektoren der zweiten Gruppe durchweg Anteilseinbußen hinnehmen.

**Tab. 2:**  
**Reale Wachstumsraten der sektoralen Nettoproduktionen in den drei Szenarien**  
**(in %/a) – Preisbasis 1970**

Sektor	Szen	70/75	75/80	80/85	85/90	90/95	95/00	00/05	05/10
Energie und Bergbau	1	2,20	4,68	3,65	2,95	3,18	3,01	2,69	2,25
	2			3,67	3,95	4,42	4,49	4,35	4,25
	3			3,11	2,42	2,51	2,17	1,90	1,80
Grundstoffe und Produktionsgüter	1	2,14	4,46	3,69	3,12	3,12	2,98	2,84	2,64
	2			3,75	3,96	4,52	4,74	4,75	4,77
	3			2,88	2,29	2,03	1,69	1,54	1,47
darunter Steine und Erden	1	1,84	3,33	2,43	2,21	2,66	2,55	2,36	2,13
	2			2,51	2,86	3,12	3,26	3,23	3,33
	3			1,33	1,04	2,04	1,73	1,64	1,62
Eisen	1	0,99	2,83	2,14	1,91	1,99	2,01	1,93	1,87
	2			2,25	2,18	2,48	3,46	3,26	3,17
	3			1,39	0,99	0,82	0,70	0,75	0,83
Nichteisen	1	2,69	4,16	3,19	3,00	2,95	2,85	2,62	2,28
	2			3,22	3,36	3,95	4,08	4,02	4,00
	3			2,43	1,62	1,27	1,03	1,03	1,06
Chemie	1	2,90	6,03	5,36	4,31	4,03	3,82	3,63	3,38
	2			5,39	5,22	5,90	5,89	5,84	5,76
	3			4,28	3,40	2,78	2,34	2,08	1,90
Holz, Zellstoff, Papier, Pappe	1	2,63	4,08	3,23	3,03	2,70	2,63	2,46	2,25
	2			3,29	2,77	2,89	3,17	3,34	3,44
	3			2,19	1,64	1,74	1,50	1,39	1,37
Restliche Grundstoffe	1	1,74	3,74	2,55	2,07	2,15	2,01	1,80	1,54
	2			2,64	3,44	3,77	3,83	3,82	3,80
	3			2,34	1,80	1,46	1,02	0,91	0,87
Investitionsgüter	1	1,85	3,90	3,31	3,01	2,87	2,89	2,80	2,79
	2			3,31	3,46	4,28	4,24	4,22	4,20
	3			2,66	2,13	1,78	1,67	1,61	1,55
Verbrauchsgüter	1	2,38	3,81	2,85	2,46	2,52	2,32	1,98	1,64
	2			2,89	2,71	2,97	3,04	2,89	2,74
	3			2,03	1,46	1,36	1,21	1,17	1,14
Nahrungs- und Genußmittel	1	1,64	2,84	1,79	1,41	1,42	1,13	1,05	1,01
	2			1,85	1,77	1,27	1,52	1,51	1,60
	3			1,76	1,54	1,53	1,39	1,17	1,00
Verbrauchsnahe Bereiche	1	2,08	4,18	3,23	3,01	2,96	2,81	2,62	2,33
	2			3,27	3,30	3,94	3,94	3,88	3,81
	3			3,06	2,82	2,56	2,12	1,99	1,88
Bruttoinlands- produkt	1	2,06	4,11	3,23	2,93	2,89	2,77	2,59	2,36
	2			3,26	3,34	3,94	3,99	3,95	3,91
	3			2,86	2,50	2,27	1,93	1,81	1,72

Referenzszenario (1), Prosperitätsszenario (2); Restriktionsszenario (3)

Der Bereich „Energie und Bergbau“ gehört der ersten Gruppe an, da die Wachstumsraten fast immer über denen der Gesamtwirtschaft liegen. Sogar im Restriktionsszenario sind trotz rigoroser Energieeinsparungen noch Anteilsgewinne zu verzeichnen. Im Szenario Prosperität folgen die hohen Anteilszuwächse aus dem wirtschaftlichen Aufschwung.

Die Basisindustrie „Steine und Erden“, „Holz/Zellstoff/Papier/Pappe“ und „Restliche Grundstoffe“ sind in allen drei Szenarien von Anteilsverlusten be-

troffen, die „Nichteisenmetallindustrie“ jedoch nur im Restriktionsszenario. Die Sättigungstendenzen schlagen dabei im Prosperitätsszenario trotz höherer absoluter Werte noch stärker durch, da das im Nenner stehende Bruttoinlandsprodukt wesentlich größer ist. Im Restriktionsszenario sind die Rückgänge mit der sich teilweise vollziehenden Abkehr der Nachfrage von industriellen Produkten zu begründen.

Als einziger der Grundstoff- und Produktionsgüterbereiche kann nach den Modellrechnungen die „Chemie“ Strukturanteilsgewinne erwarten. Dies resultiert aus der Eigenschaft der gesamten Branche als Innovationsindustrie. Besonders hoch ist der Zuwachs im Szenario Prosperität, da hier die Chemie ein wesentlicher Träger des wirtschaftlichen Aufschwungs ist.

Deutliche Auswirkungen auf die Anteilsentwicklung der „Investitionsgüterindustrie“ haben – wie leicht erklärlich – die Rahmenbedingungen der drei Szenarien. Beachtlichen Steigerungen in den beiden ersten Szenarien steht ein Verlust von mehr als einem Prozentpunkt im Falle einer forcierten Entwicklung zur tertiären Gesellschaft gegenüber.

Die Bedeutung der „Verbrauchsnahen Bereiche“ für das Bruttoinlandsprodukt wird sehr stark von den Szenarienannahmen geprägt. Im Restriktionsszenario, das explizit die Entwicklung von der sekundären (Industrie-) zur tertiären Zivilisation (Dienstleistungsgesellschaft) unterstellt, wächst der Bruttoinlandsprodukt-Anteil der „Verbrauchsnahen Bereiche“ von 1980 bis 2010 um etwa vier Prozentpunkte. Dagegen sind in den beiden anderen Szenarien, die von einer Beibehaltung der gegenwärtigen Werte und Normen ausgehen, nur geringe Zuwächse (Referenzfall) bzw. sogar Verluste (Prosperitätsfall) zu verzeichnen.

Obwohl auch die Teilbereiche des Sektors „Verbrauchsnahe Bereiche“ von den zugrunde gelegten Bedingungen und den industriellen Entwicklungen unterschiedlich beeinflusst werden, läßt sich generell festhalten: Der Anteil des Staates und der Sozialversicherungen wird jeweils stark an Bedeutung gewinnen, während die Beiträge des Baugewerbes – relativ gesehen – in jedem Fall sinken werden. Auch die Sektoren „Verbrauchsgüter“, und „Nahrungs- und Genußmittel“ verlieren in jedem der drei Szenarien an Bedeutung, d. h. ihr Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt ist rückläufig.

### **Verfügbare Einkommen und Konsumquote**

Die Entwicklung der verfügbaren Einkommen hängt von der allgemeinen Wirtschaftsentwicklung, von der Erwerbsstruktur, von der Einkommensentwicklung und von der Arbeitszeitentwicklung ab.

Für das Referenzszenario wird angenommen, daß die Summe der verfügbaren Einkommen wie bisher auch weiterhin unterproportional zum Bruttoinlandsprodukt wächst; die Voraussetzungen für eine expandierende Wirtschaft

demnach insoweit nicht gefährdet sind. Für den Abstand der beiden in Rede stehenden Wachstumsraten wird aber angenommen, daß dieser von 0,4%/a in den 80er Jahren auf 0,1%/a bis 0,2%/a in den 90er Jahren reduziert wird.

Im Prosperitätsszenario wird davon ausgegangen, daß bei expandierender Wirtschaft, zunehmenden materiellen Ansprüchen, vermehrten Engpässen am Arbeitsmarkt und kürzerer Arbeitszeit die verfügbaren Einkommen schneller wachsen als das Bruttoinlandsprodukt. Dabei kann sich eine Wachstumsratendifferenz von durchschnittlich 0,1%/a zugunsten der verfügbaren Einkommen ergeben.

Auch für das Restriktionsszenario wird angenommen, daß nach 1990 bei sinkenden gesamtwirtschaftlichen Wachstumsraten das Wachstum aller verfügbaren Einkommen über dem des Bruttoinlandsprodukts liegt. Dieser Umstand ergibt sich hier, nachdem sich die Lage am Arbeitsmarkt entspannt hat. Bis zum Jahre 2000 dürften beide Wachstumsraten jedoch wieder aneinander angeglichen sein.

Das verfügbare Einkommen im Referenzszenario steigt damit auf mehr als den doppelten Wert des Jahres 1980 am Ende des Betrachtungszeitraums an. Im Restriktionsszenario ist es fast doppelt so groß wie zur Zeit, und im Prosperitätsszenario wird sogar eine Verdreifachung der verfügbaren Einkommen errechnet. Auch das pro Einwohner oder pro Erwerbstätigen verfügbare Einkommen folgt nahezu der jeweiligen gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (siehe Tab. 3).

### **Kosten der Autohaltung**

Die Abschätzung der Verbrauchsausgaben zur privaten Pkw-Haltung zeigt, daß Autofahren auch in Zukunft erschwinglich bleibt. In den Pkw-Aufwendungen werden neben den laufenden Verbrauchsausgaben für Kraftstoffe, Ersatzteile, Öle, Inspektionen, Pflege, Reparaturen etc. auch die Haltungskosten wie Prämien für Versicherungen sowie kalkulatorische Abschreibungen und Zinsen erfaßt.

Real-steigende Anschaffungskosten und Kraftstoffkosten, Größenklassenverschiebungen, Fahrleistungsveränderungen, Mehrwagenausstattungen der privaten Haushalte, Verschiebungen des Verhältnisses von Neu- zu Gebrauchtwagenzulassungen u. a. m. ergeben per Saldo eine Steigerung der gesamten Pkw-Aufwendungen des motorisierten privaten Haushalts bis zum Jahr 2010 um 30% im Referenzfall und um 70% im Prosperitätsfall. Im Restriktionsszenario sinken die mit der Pkw-Haltung verbundenen Aufwendungen in diesem Zeitraum jedoch um 10%. Der Anteil der Betriebskosten an den gesamten Aufwendungen für die Pkw-Haltung erhöht sich in jedem Szenario.

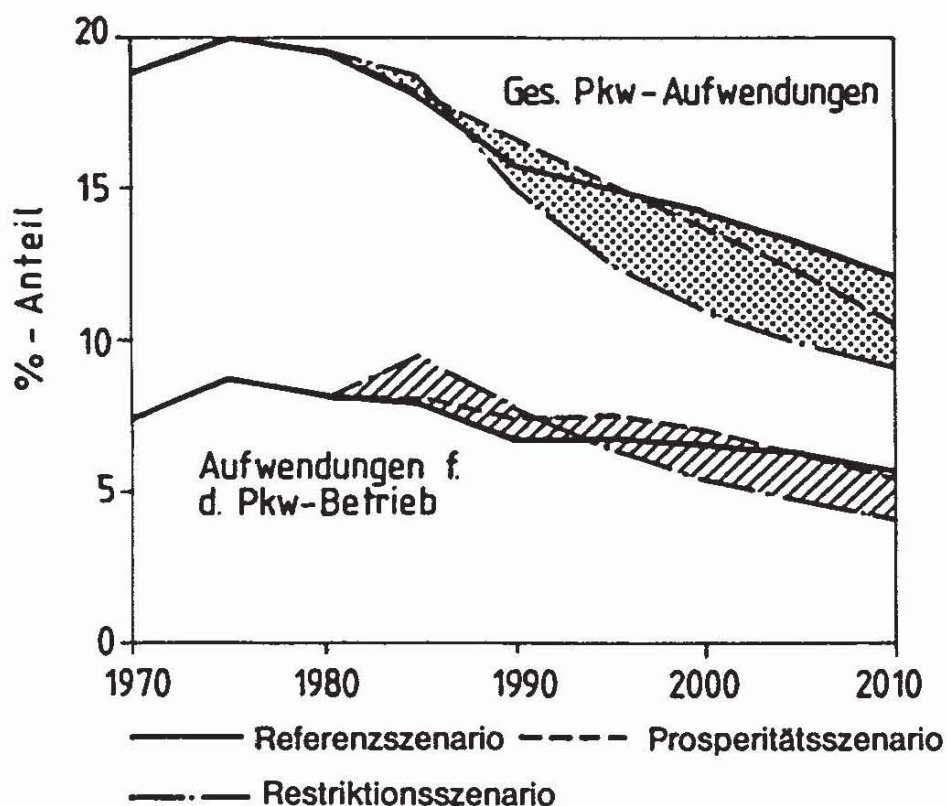
Insgesamt steigen jedoch die Pkw-Aufwendungen langsamer als das verfügbare Einkommen und der private Verbrauch je Haushalt, damit setzt sich der in

**Tab. 3:**  
**Reale verfügbare Einkommen und realer privater Verbrauch in den drei Szenarien**  
**(Preisbasis 1970)**

Kennzahl	Szen.	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	Einheit
Summe der verfügbaren Einkommen	1	434,0	502,0	562,9	640,4	736,2	841,6	953,0	1074,0	1206,0	Mrd. DM/a
	2				640,4	780,8	941,3	1180,0	1445,0	1749,0	
	3				632,7	718,6	809,3	905,7	997,8	1086,0	
Privater Verbrauch	1	374,5	423,2	497,0	563,6	640,5	723,8	810,1	912,9	1025,0	Mrd. DM/a
	2				563,6	658,1	800,1	979,4	1185,0	1434,0	
	3				556,8	632,4	712,2	797,0	878,1	955,7	
Verfügbares Einkommen/Kopf	1	7 080	8.110	9.260	10.700	12.600	14.700	17.100	19.400	21 900	Tsd. DM/a Einwohn.
	2				10.700	13.000	16.300	20.700	25.400	30 800	
	3				10.600	12.200	14.000	15.900	17.600	19.300	
Verfügbares Einkommen/Erwerbstätiger	1				24.700	28.400	33.300	38.000	43.000	48.400	Tsd. DM/a Erwerbstätiger
	2	16 300	19.800	22.000	24.700	29 300	35.400	44.200	54.100	56.800	
	3				24.400	27.900	32.100	36.200	39.900	43.400	
Konsumquote (100 - [minus Sparquote])	1	86,3	84,3	88,3	88,0	87,0	86,0	85,0	85,0	85,0	%
	2					86,5	85,0	83,0	82,0	82,0	
	3					88,0	88,0	88,0	88,0	88,0	

Referenzszenario (1), Prosperitätsszenario (2), Restriktionsszenario (3)

der Vergangenheit schon erkennbare Trend zur relativen Verringerung der Gesamtaufwendungen eines motorisierten Privaten Haushalts für die Pkw-Haltung in allen drei Szenarien auch in der Zukunft fort, wie aus Abb. 4 ersichtlich ist.



**Abb. 4: Prozentuale Anteile der gesamten realen Pkw-Aufwendungen und der realen Aufwendungen für den Pkw-Betrieb am realen privaten Verbrauch je privatem Haushalt in den drei Szenarien.**

## **Kapitel 5: Verkehrswirtschaftliche Entwicklungen**

Die demographische und wirtschaftliche Entwicklung liefert die wesentlichen Bestimmungsgrößen für die Verkehrsnachfrage. Sie wird im Gesamtmodell-system getrennt nach Personen- und Güterverkehrsleistung mit Hilfe des Verkehrsmoduls ermittelt.

Die Transportleistung des Personenverkehrs, Personenverkehrsleistung genannt, wird direkt aus der soziodemographischen Entwicklung projiziert. Die rechnerische Verteilung auf die Verkehrsträger Straße, Schiene und Luft erfolgt nach artspezifischen Anteilen.

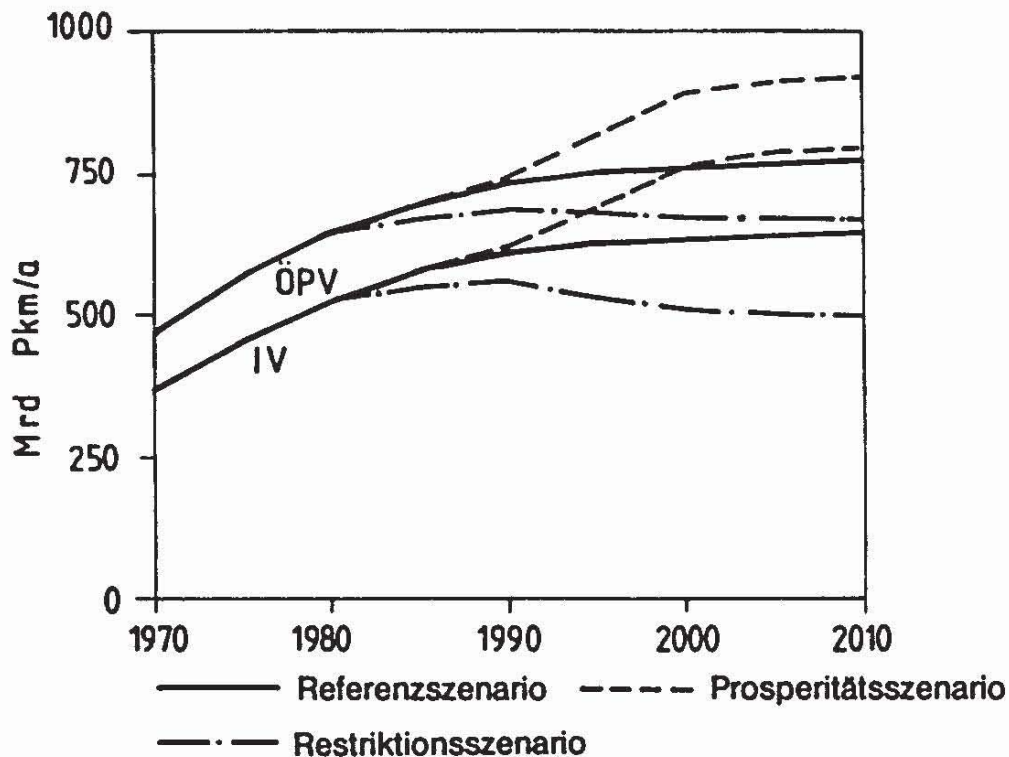
Die Transportleistung des Güterverkehrs, Güterverkehrsleistung genannt, wird indirekt aus der Summe der sektoralen Verkehrsaufkommen ermittelt. Das gesamte Verkehrsaufkommen wird mit artspezifischen Anteilen auf die Verkehrsträger Straße, Schiene, Binnenschiff und Rohrfernleitungen rechnerisch verteilt. Die beiden Verkehrsaufkommen von Luftfracht und Seeschifffahrt ergeben sich aus Korrelationen zur Bruttoinlandsproduktentwicklung. Das Produkt von verkehrsträgerspezifischem Verkehrsaufkommen und verkehrsträgerspezifischer Transportweite ergibt die artspezifische Güterverkehrsleistung.

### **Personenverkehr**

Die Modellrechnungen ergeben, daß die Personenverkehrsleistung im Referenzfall in der Zeit zwischen 1980 und 2010 noch etwa um 20% zunehmen wird. Am Ende dieses Zeitraums sind jedoch deutliche Sättigungstendenzen zu erkennen. Mit Beginn der Wachstumsphase im Prosperitätsszenario dürfte auch die Personenverkehrsleistung infolge einer größeren Mobilität der Wohnbevölkerung stärker anwachsen und bis zum Jahr 2010 den Referenzwert des Jahres 1980 um etwa 40% übersteigen. Aus der Grundhaltung des Szenarios Restriktion ist abzuleiten, daß die Personenverkehrsleistung bis etwa 1990 ein Maximum erreicht haben wird und danach stagniert (siehe Abb. 5).

Im Zeitraum zwischen 1970 und 1980 stieg der Anteil des Individualverkehrs an der Personenverkehrsleistung von etwa ca. 79% auf knapp 82%. Im Referenzfall wird nicht erwartet, daß Maßnahmen der Verkehrspolitik den Individualverkehr fördern. Nach 1985 dürfte dessen Anteil an der Personenverkehrsleistung mit rd. 83% keine weitere Steigerung mehr erfahren (Abb. 5).

Im Prosperitätsszenario wird davon ausgegangen, daß bei einem anhaltenden, starken Wirtschaftswachstum und einer daraus erfolgenden Neuorientierung der Verkehrspolitik auch der Individualverkehr einen größeren Spielraum haben wird, so daß dieser im Jahr 2010 mit etwa 87% zur Personenverkehrsleistung beiträgt.



**Abb. 5: Entwicklung der Personenverkehrsleistung nach den Arten Individualverkehr (IV) und Öffentlicher Verkehr (ÖPV) in den drei Szenarien.**

Aus der für das Szenario Restriktion angenommenen Grundhaltung folgt, daß das Maximum des Individualverkehrs-Anteils bis 1985 erreicht wird und daß die in den Annahmen dargestellten Sachzwänge einen Rückgang bis zum Jahr 2010 auf etwa 75 % der gesamten Personenverkehrsleistung bewirken, was dem Stand von vor 1970 entspricht.

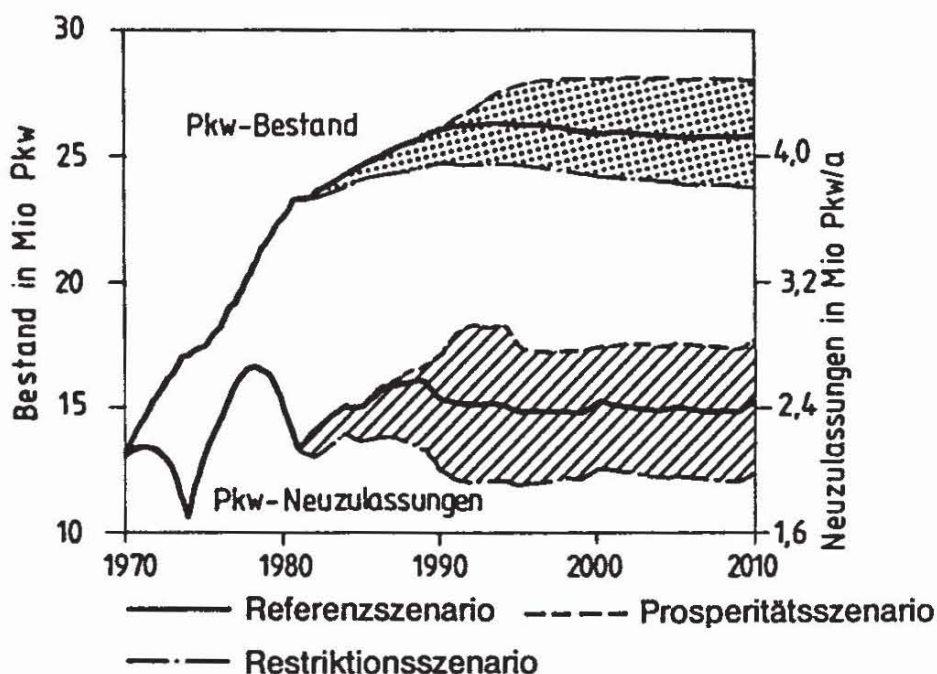
Aus den zuvor erläuterten Gründen steigt von 1980 an bis zum Jahr 2010 die Individualverkehrsleistung um etwa 20% im Referenzfall. Im Szenario Prosperität ist die Zunahme doppelt so hoch, während im Szenario Restriktion sogar eine Abnahme der Individualverkehrsleistung auf ein geringeres Niveau als heute errechnet wird.

### Individualverkehr (IV)

Die Entwicklung der Pkw-Bestände wird aus der Entwicklung der motorisierungsrelevanten Bevölkerung im Alter zwischen 18 und 70 Jahren und einer mittels Korrelationen errechneten Dichtefunktion ermittelt. Aus Abb. 6 ist ersichtlich, daß der Pkw-Bestand in den nächsten Jahren weiter ansteigt. Danach ist bei sinkender motorisierungsrelevanter Bevölkerung generell ein Rückgang zu erwarten. Aus den für das Prosperitätsszenario getroffenen Annahmen ergibt sich, daß der Pkw-Bestand noch um 2 Mio. Pkw über den im Referenzfall anwächst und sich dann auf einem Niveau von etwa 28 Mio. Pkw stabilisiert. Aus der für das Restriktionsszenario typischen Haltung folgt, daß zwischen 1990 und 1995 das Maximum mit knapp 25 Mio. Pkw bereits überschritten wird.



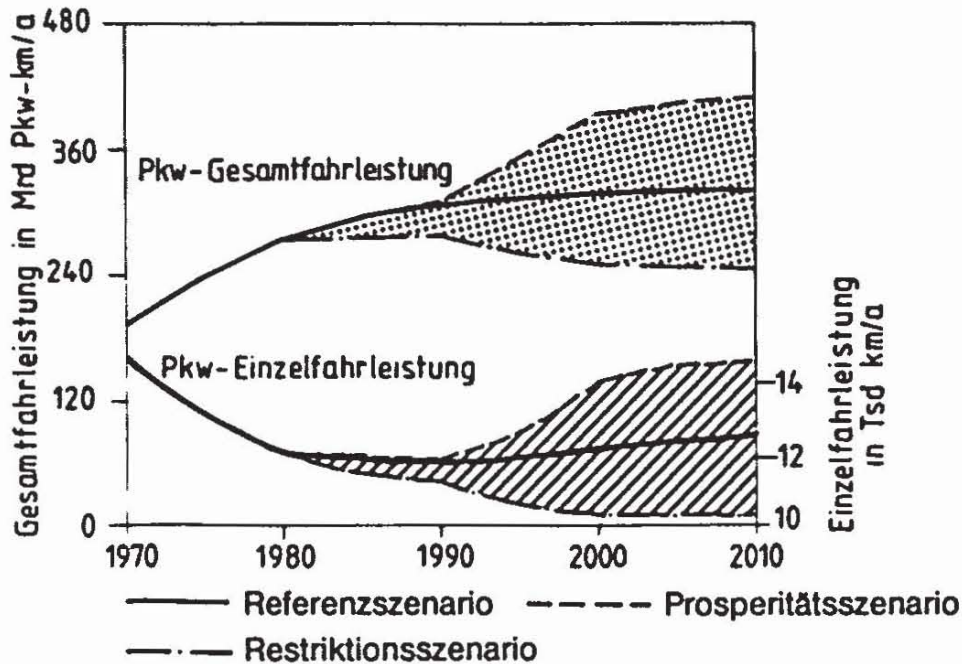
Versucht man aus den Bestandsänderungen die jährlichen Neuzulassungen zu projizieren, so müssen Annahmen über Anzahl der amtlichen Löschungen von Fahrzeugen im Kraftfahrzeugregister und damit über die durchschnittliche Lebensdauer der Pkw gemacht werden. Unterstellt man für den Referenzfall unter Außerachtlassen subtilerer Aspekte ein langsames Anwachsen der durchschnittlichen Pkw-Lebensdauer von derzeit etwa 10,5 Jahre auf 11,0 Jahre bis zum Jahr 2000, im Prosperitätsszenario nach demselben Anstieg bis 1990 einen Rückgang auf 10,5 Jahre und im Restriktionsszenario einen permanenten Anstieg bis auf 12,5 Jahre zur Jahrtausendwende, so ergibt sich die ebenfalls in Abb. 6 dargestellte Entwicklung. Im Referenzfall stabilisieren sich die Neuzulassungen bei etwa 2,4 Mio. Pkw/a zur Jahrtausendwende. Die Zahl der jährlich neuzugelassenen Pkw dürfte im Prosperitätsszenario um 0,4 Mio. höher und im Restriktionsszenario um etwa die gleiche Anzahl niedriger liegen. Die recht dynamische Entwicklung der Neuzulassungen ist Folge von Echoeffekten aus der Neuzulassungskonjunktur vergangener Jahre.



**Abb. 6: Entwicklung des Pkw-Bestandes und der Pkw-Neuzulassungen**

Aus der Individualverkehrsleistung läßt sich über Annahmen zur Entwicklung des Besetzungsgrades von Pkw die Pkw-Gesamtfahrzeugleistung ermitteln. Während diese Leitgröße in dem Referenzszenario und in dem Prosperitätsszenario von heute bis zum Jahr 2010 degressiv um 17% bzw. 50% ansteigt, erreicht sie im Szenario Restriktion etwa Mitte der 80er Jahre ein Maximum und fällt bis zum Jahr 2010 wieder in etwa auf den Stand der 70er Jahre (Abb. 7).

Für die Pkw-Einzelfahrleistung folgt daraus, daß diese im Referenzfall wie in den vergangenen Jahren bis etwa 1990 weiter auf knapp 12 000 km/a absinken, danach jedoch mit zunehmender Überwindung der Friktionen in der



**Abb. 7: Entwicklung der Pkw-Gesamt- und Einzelfahrleistung**

Energieversorgung und im Verkehrsablauf wieder den Stand von vor 1980 erreichen wird. Für das Szenario Prosperität kann sogar angenommen werden, daß die Pkw-Einzelfahrleistung bis zum Jahr 2010 deutlich zunimmt und die Werte des Jahres 1970 wieder erreicht werden. Aus der im Szenario Restriktion unerstellten Haltung ist hingegen zu folgern, daß die Pkw-Einzelfahrleistung bis auf etwa 10 300 km/a im Jahr 2010 absinken dürfte. Das ergibt sich aus einer stark verminderten Gesamtfahrleistung des noch recht hohen Pkw-Bestandes, der auch bei deutlichem Willen zur eingeschränkten Nutzung des Pkws in diesem Szenario nur sehr langsam reduziert wird.

### Öffentlicher Personenverkehr (ÖPV)

Die relative Bedeutung des Öffentlichen Personenverkehrs wird, gemessen an der Verkehrsleistung, im Referenzfall und im Prosperitätsfall weiter zurückgehen. Absolut wird die ÖPV-Leistung im Referenzszenario von jetzt an bis zum Jahr 2010 jedoch noch um 10% steigen, während sie im Szenario Prosperität ca. 1995 ein Maximum mit einem Gesamtzuwachs von 8% überschreitet und danach bis zum Jahr 2000 wieder den Wert von etwa 1985 erreichen dürfte.

Wesentliche Bedeutung kommt der Verteilung des Öffentlichen Personenverkehrs auf die Verkehrsträger und den Verteilungsänderungen zu, da diese einen erheblichen Einfluß auf die Energieverbrauchsstruktur des Öffentlichen Personenverkehrs haben.

Der Öffentliche Straßenpersonenverkehr erreicht im Referenzszenario die heute erbrachte Verkehrsleistung in Zukunft nicht mehr. Bis etwa 1990 wird diese um ca. 15% absinken und sich dann stabilisieren. Aus Abb. 8 wird

ersichtlich, daß die Abnahme des gesamten Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs nur durch den Rückgang des Nahverkehrs verursacht wird, der zu fast 90% den Öffentlichen Straßenpersonenverkehr trägt.

Im Prosperitätsszenario sieht die Entwicklung infolge der starken Hinwendung zum Individualverkehr vergleichsweise noch ungünstiger aus, so daß bis zum Projektionsende der Rückgang mit rd. 20% noch um ein Drittel höher ausfällt als im Referenzfall. Der Fernverkehr ist davon nahezu nicht betroffen.

Aus der im Restriktionsszenario unterstellten Haltung folgt hingegen nach einer Abnahme bis zum Jahr 1990 eine erhebliche Steigerung des Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs um rd. 20%. Der Nahverkehr profitiert davon mit einer Steigerung von heute bis zum Projektionshorizont um knapp 10%, während die Leistung des Fernverkehrs um etwa 40% zunimmt.

Der Zuwachs des Schienenpersonenverkehrs wird im Referenzszenario nur von dem Zuwachs des Fernverkehrs getragen, wobei dieser die leichte Abnahme des Nahverkehrs überkompensiert. Die Gründe für den Rückgang des Schienenpersonennahverkehrs sind dieselben wie für den Rückgang des Straßenpersonennahverkehrs.

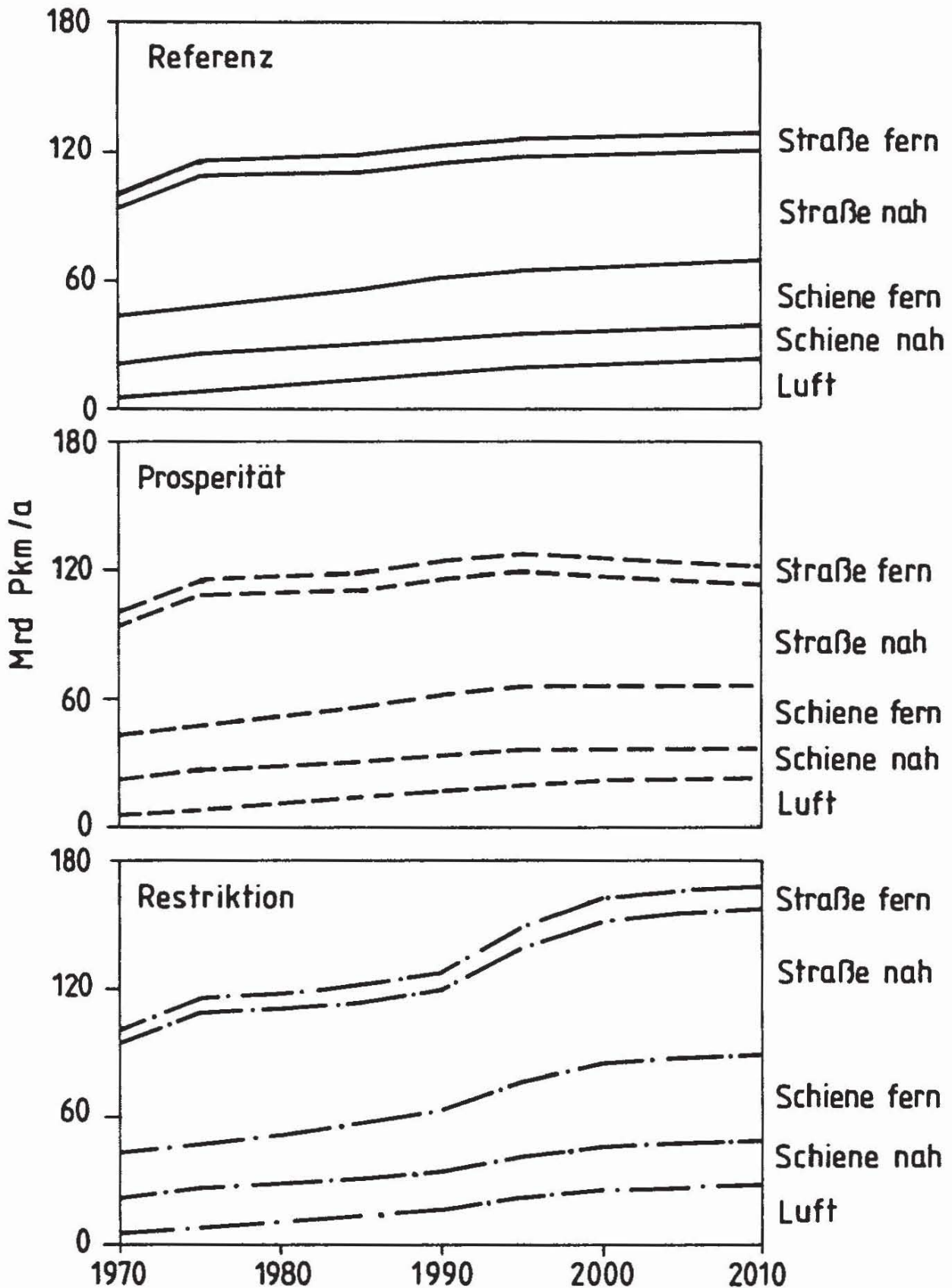
Im Prosperitätsszenario zeigt sich für den Schienenpersonenverkehr bis zum Jahr 1995 etwa der gleiche Anstieg wie im Referenzszenario. Danach ist jedoch ein starker Rückgang bis auf das Niveau des Jahres 1985 zu erkennen, der fast ausschließlich vom veränderten Modal Split im Nahverkehr verursacht wird.

Im Restriktionsszenario errechnet sich ein erheblicher Anstieg der Öffentlichen Schienenpersonenverkehrsleistung um fast 50% zu Lasten des Individualverkehrs, besonders nach 1985, wenn der Pkw-Bestand stagniert.

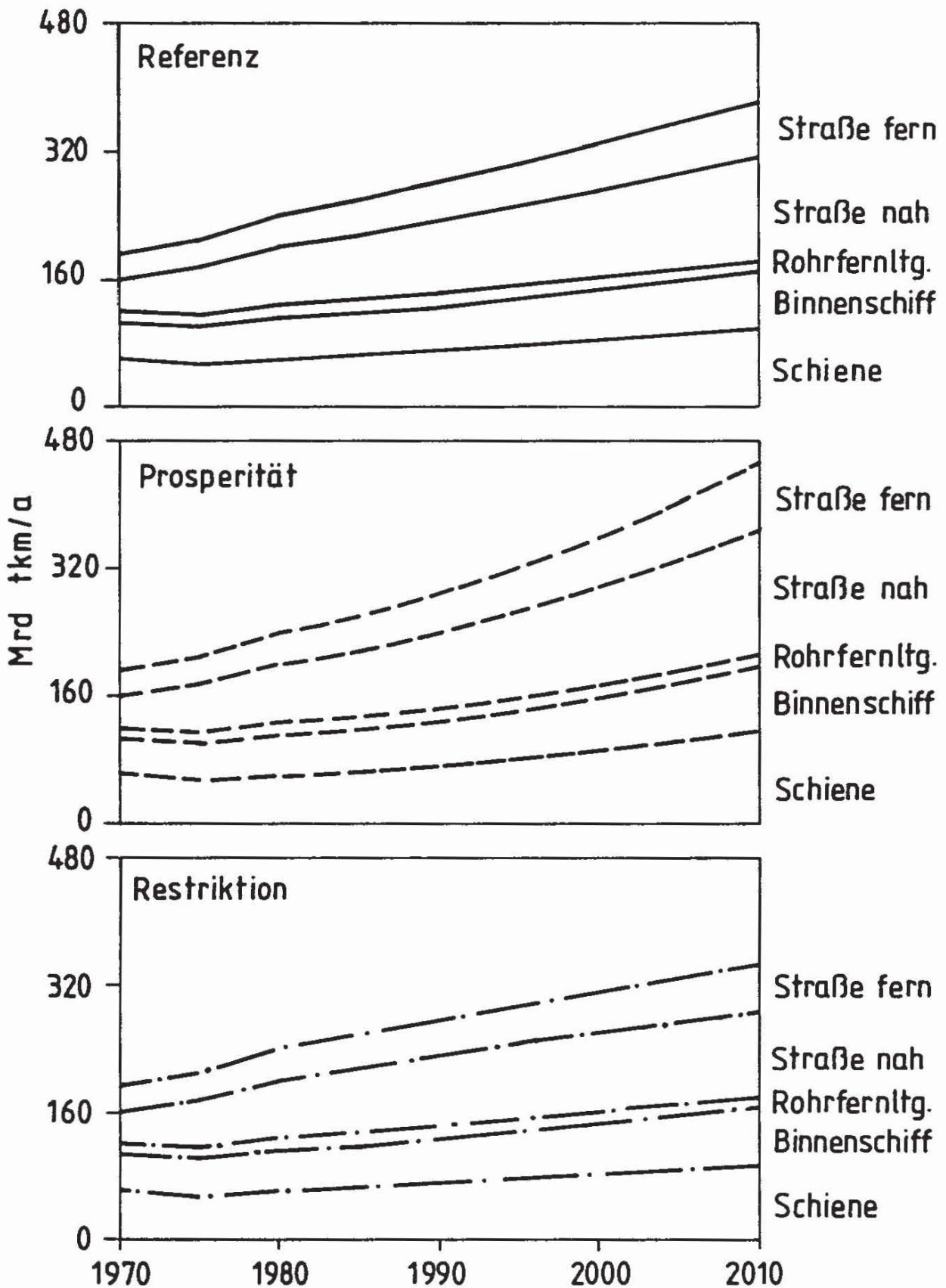
Der Luftverkehr in der Bundesrepublik Deutschland einschließlich von und nach West-Berlin weist in allen Szenarien die höchsten Steigerungsraten der untersuchten Verkehrsarten auf. Er wird sich bis zum Projektionsende in den Szenarien Referenz und Prosperität in etwa verdoppeln. Widersprüchlich erscheint auf den ersten Blick im Restriktionsszenario die Steigerung der Verkehrsleistung im Öffentlichen Luftpersonenverkehr, jedoch ist dies erklärbar durch die Zunahme des Passagieraufkommens auf den längeren Flugstrecken.

## **Güterverkehr**

Zur Bestimmung der Güterverkehrsleistung wird das Gesamtgüterverkehrsaufkommen entsprechend der projizierten Anteilsentwicklung auf die Verkehrsträger verteilt und dann mit den trägerspezifischen durchschnittlichen Transportweiten multipliziert. Wie aus Abb. 9 zu ersehen ist, nehmen die Leistungen aller Verkehrsträger – mit Ausnahme der Rohrfernleitungen –



**Abb. 8: Entwicklung des Öffentlichen Personenverkehrs nach Verkehrsarten in den 3 Szenarien (Stat. Abgrenzung nach „Verkehr in Zahlen“ DIW 1982)**



**Abb. 9: Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsträgern in den drei Szenarien**

ständig zu. Da dies aber nicht im gleichen Verhältnis geschieht, ergeben sich in der strukturellen Zusammensetzung der gesamten Güterverkehrsleistung Verschiebungen. Als auffälligstes Ergebnis ist zu entnehmen, daß kumulativ Eisenbahn, Binnenschiff und Rohrfernleitungen in allen drei Szenarien zugunsten der Straße an Bedeutung verlieren.

Sowohl nach Aufkommen als auch nach Leistung bestreitet der Straßengüternahverkehr und -fernverkehr den größten Teil des inländischen Güterverkehrs. Die Wachstumsraten des Straßengüterfernverkehrs liegen im Referenzszenario mit 1,9%/a über denen aller anderen Verkehrsträger (Eisenbahn 1,6%/a, Binnenschiffahrt ca. 1%/a). Im Prosperitätsszenario, das ja insgesamt höhere Verkehrsleistungen projiziert, wachsen die Leistungen des Straßengüterfernverkehrs zwischen 1980 und 2010 sogar jährlich um etwa 2,6%. Er übernimmt damit knapp 40% des Zuwachses an der Güterverkehrsleistung bis zum Jahr 2010.

### **Abb. 9: Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsträgern in den drei Szenarien**

Mit einem Wachstum von knapp 3,5% p. a. im Betrachtungszeitraum steigt die Leistung dieses Verkehrsträgers im Szenario „Restriktion“ nur geringfügig stärker als die gesamte Güterverkehrsleistung.

Für die bestehende bzw. sogar zunehmende Bedeutung des Straßengüterverkehrs sind zwei Aspekte entscheidend: Erstens die Vorteile des Lkw als Transportmittel, die sich in einer Haus-Haus-Bedienung, dem Wegfall von Umladungen, einer schnellen Beförderung und der Erfassung der von anderen Verkehrsmitteln nicht zu erreichenden Gebiete ausdrücken. Und zweitens, daß sich gerade die Sektoren wirtschaftlich besonders günstig entwickeln, deren Güter vornehmlich auf der Straße transportiert werden. So beträgt der Anteil des Straßengüterverkehrs am Güterverkehrsaufkommen der chemischen Industrie über 70%. Von den Investitionsgütern werden etwa 50% im Straßengüternahverkehr und 35% im Straßengüterfernverkehr befördert. Im verkehrsaufkommenstärksten Bereich, dem Baugewerbe, das immerhin die Hälfte des gesamten Güterverkehrsaufkommens aufbringt, entfallen ca. 90% auf den Straßengüternahverkehr.

Für die Jahre nach 1980 wird beim Schienengüterverkehr in allen Szenarien von relativ einheitlichen Entwicklungen ausgegangen. Das führt dazu, daß die Schienenverkehrsleistungen bis 2010 absolut auf das Eineinhalb- (Referenzszenario) bis fast Zweifache (Prosperitätsszenario) steigen. Relativ günstig ist dabei die Entwicklung im Szenario Restriktion, da hier der Ausbau des Schienennetzes zügig vorangetrieben wird.

Diese für die Bahn günstige Entwicklung geht zu Lasten des Straßengüterverkehrs. Allerdings läßt gerade im Szenario Restriktion die wirtschaftliche Entwicklung der Sektoren, die den Großteil der Schienengüterverkehrs-

leistungen nachfragen, zu wünschen übrig. Im Energiebereich, wo die Bahn z. B. 75% der Kohletransporte vornimmt, im Bergbau und in den Eisen-, Stahl- und NE-Metallindustrien, deren Güterverkehrsnachfrage zu über 50% von der Bahn gedeckt wird, werden nur geringe Wirtschaftswachstumsraten erzielt. Und in den wirtschaftlich aufstrebenden Sektoren ist der Anteil der Bahn am Gütertransport sehr gering (z. B. in der Chemie unter 10%).

Die Binnenschifffahrt, die ja ebenfalls vor allem Massengüter transportiert, hat im wesentlichen die gleichen Probleme wie der Schienengüterverkehr. Dementsprechend weist sie in den Szenarien Referenz und Prosperität auch dieselben durchschnittlichen Wachstumsraten wie der Schienengüterverkehr auf. Im Restriktionsszenario schneidet die Binnenschifffahrt dann sogar etwas besser ab als die Eisenbahn. Zurückzuführen ist das auf die Kostenvorteile der Schifffahrt und auf die veränderte Einstellung der Menschen gegenüber dem Beurteilungskriterium Zeit.

Im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern sind die Rohrfernleitungen benachteiligt, da nur bestimmte Güterarten in ihnen transportiert werden können. Als Nachfrager treten somit nur die Sektoren „Energie und Bergbau“ und in sehr beschränktem Umfang „Chemie“ auf. Da die Verwendung von Erdöl als Energieträger je nach Szenario früher oder später nachläßt, gehen auch die Güterverkehrsleistungen der Rohrfernleitungen zurück.

Der Luftfrachtverkehr über dem Bundesgebiet sowie von und nach Berlin kann eindeutig die höchsten Wachstumsraten verzeichnen. Die Güterverkehrsleistungen steigen nämlich bis zum Jahre 2010 je nach Szenario zwischen 3%/a und 5%/a. Allerdings ist der Luftfrachtverkehr derzeit noch so unbedeutend (ca. 0,1% der Gesamtverkehrsleistung), so daß auch derart hohe Wachstumsraten daran nicht so schnell etwas ändern können.

Abweichend von der üblichen Konzeption, nur den binnenländischen Güterverkehr zu berücksichtigen, wurde die Seeschifffahrt zwischen den Häfen der Bundesrepublik sowie von und nach ausländischen Häfen mit in die Berechnungen einbezogen. Die Versorgung der Seeschiffe mit Bunkeröl macht einen beträchtlichen Teil der Inlandsnachfrage nach Mineralölprodukten aus.

Der Anteil der Seeschifffahrt am Güterverkehrsaufkommen ist mit etwa 4,5% nicht sehr hoch, aber die Güterverkehrsleistungen sind wegen der enormen durchschnittlichen Transportweiten von über 7 500 km etwa fünfmal so hoch wie die anderen Verkehrsträger zusammen.

Die Steigerungen der Verkehrsleistungen der Seeschifffahrt zwischen 75% (Prosperitätsszenario) und 44% (Restriktionsszenario) von heute bis zum Projektionshorizont beruhen auf dem Ausbau der internationalen Wirtschaftsbeziehungen. Hinzu kommt, daß die Bundesrepublik Deutschland besonders unter den Bedingungen des Szenarios Prosperität viel Kohle importieren muß, um den industriellen Aufschwung überhaupt energetisch sichern zu können.

## **Kapitel 6: Energienachfrage – Wachstum oder Rückgang?**

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung der Energienachfrage und den Wettbewerb zwischen den verschiedenen Energieträgern und Energietechnologien zur Deckung dieser Nachfrage in dem Sektor Haushalte und Kleinverbraucher und in der Industrie, sowie die Entwicklung des Primärenergieträgerverbrauchs in den einzelnen Szenarien. Die Zahlenangaben dürfen nicht als Prognosen mißverstanden werden, sie sind allenfalls eine notwendigerweise quantitative Beschreibung qualitativer Zukunftsentwicklungen. Ihr Aussagewert ergibt sich nur im Zusammenhang mit den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Annahmen.

Seitdem die Fragen der Energieversorgung, ausgelöst durch die sog. erste Ölkrise im Jahre 1973, zu einem zentralen Thema der öffentlichen und politischen Diskussion geworden sind, hat nicht nur die Zahl der veröffentlichten Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des Energiebedarfs und seiner Deckung sprunghaft zugenommen, sondern sie sind auch zunehmend widersprüchlicher und kontroverser geworden. Erheblich voneinander abweichende Prognosen sowie sog. Alternativszenarien zur Energiepolitik, deren Ergebnisse mehr von politischen Wunschvorstellungen und von theoretisch Denkbarem geprägt sind als von den ökonomischen und technischen Realitäten, dokumentieren diese Situation. Gibt es noch ein breites Maß an Übereinstimmung darüber, daß die Reduzierung der Ölabhängigkeit ein energiepolitisch vorrangiges Ziel ist, so sind die Wege, wie dies erreicht werden soll, umstritten. Die einen sehen in der Energiequelle „Einsparung“ die einzige Möglichkeit, unsere Abhängigkeit vom Mineralöl drastisch zu verringern und gleichzeitig den Einsatz der Kernenergie überflüssig zu machen, während die anderen die ökonomisch sinnvollen Energieeinsparmöglichkeiten geringer einschätzen und auf den Ausbau der Energieversorgung, d. h. den Einsatz der Kernenergie und die verstärkte Nutzung der Kohle setzen.

Die sachgerechte Diskussion der komplexen Energieproblematik wird dabei zusätzlich noch durch eine unsachgerechte Verwendung von Begriffen erschwert. So z. B. sprechen wir von Energieverbrauch, obwohl Energie nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik nicht verbraucht werden kann. Sie wird nur entwertet, d. h. von einem thermodynamisch höherwertigen Zustand in einen minderwertigen, letztlich den der Umgebung überführt. Verbraucht wird lediglich der jeweilige Energieträger, z. B. die Kohle, insofern er nach seinem Einsatz eben nicht mehr vorhanden ist.

Wir sprechen weiterhin von Energiebedarf und sind uns dabei in der Regel nicht bewußt, daß wir ja eigentlich keinen unmittelbaren Bedarf an Energie, sondern z. B. an physiologisch günstig temperierten Räumen, an Mobilität und Kommunikation sowie Bedarf an anderen Gütern und Dienstleistungen haben, deren Bereitstellung mit einem mehr oder weniger großen Umsatz an



Energie verbunden ist. Diesen eigentlichen Bedarf kann man entweder durch ein Mehr an technischem Aufwand (z. B. mehr Isolationsmaterial) und weniger Energieeinsatz oder durch weniger technischen Aufwand und mehr Energieeinsatz befriedigen. Ökonomisch gesprochen kann der hier gemeinte Bedarf durch unterschiedliche Kombinationen der Produktionsfaktoren Kapital, Arbeit, Energie, Rohstoff, Know-How und Zeit gedeckt werden, wobei die optimale Kombination und damit die Nachfrage nach Energie von den Preisrelationen der Produktionsfaktoren untereinander abhängt.

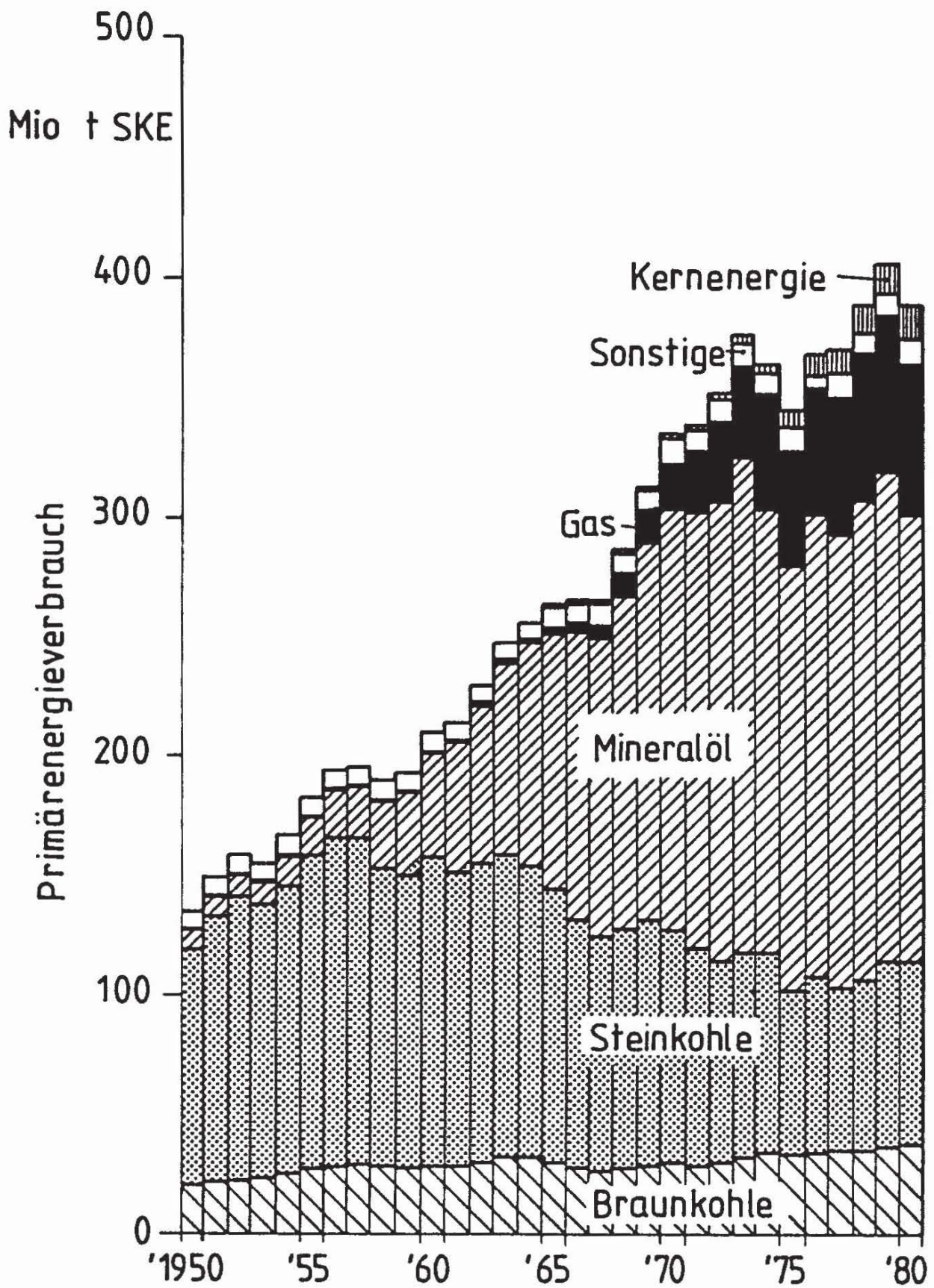
Die vorgelegte Untersuchung versucht, diesen komplexen Zusammenhängen Rechnung zu tragen. Die Nachfrage nach Energieträgern wird ausgehend von Bedarfskategorien wie Personenverkehrsleistung oder zu heizender Wohnfläche unter expliziter Berücksichtigung alternativer Endbenutzertechnologien und Energiesparmaßnahmen ermittelt. Dabei wird simultan auch die optimale Bereitstellung der Endenergieträger über die verschiedenen Umwandlungsanlagen, z. B. Kraftwerke oder Kohleveredlungsverfahren, aus den zur Verfügung stehenden Primärenergieträgern miterfaßt.

Im folgenden werden für die drei Szenarien zunächst die Entwicklungen bezüglich des Primärenergieträgerverbrauchs erläutert. Daran schließt sich eine Diskussion der Energienachfrageentwicklungen in der Industrie sowie in den Haushalten und Kleinverbrauchern an. Die Perspektiven der Energieversorgung des Verkehrssektors werden dann ausführlich in dem folgenden Kapitel diskutiert.

### **Nachfrage nach Primärenergieträger**

Der Verbrauch an Primärenergieträgern in unserem Land hat, wie aus Abb. 10 ersichtlich, von 140 Mio. t SKE im Jahre 1950 auf 390 Mio. t SKE im Jahre 1980 zugenommen. Einbrüche in der Verbrauchszunahme und kurzzeitige Verbrauchsrückgänge hatten ihre Ursachen in wirtschaftlichen Rezessionen. Insbesondere die drastischen Ölpreissteigerungen in den Jahren 73/74 und 79/80 führten in der darauffolgenden Zeit zu einem erheblichen Rückgang des Energieverbrauchs. Ein zweites Kennzeichen der Entwicklung der letzten drei Jahrzehnte war die strukturelle Verschiebung zwischen den verschiedenen Primärenergieträgern. Die Vormachtstellung der Kohle ging verloren, an ihre Stelle trat das Erdöl, das im Jahre 1980 einen Versorgungsanteil von knapp unter 50% hatte. Dabei mußten 95% des Mineralöls eingeführt werden, wodurch die Zahlungsbilanz unseres Landes mit fast 60 Mrd. DM belastet wurde. Die infolge der Ölpreiserhöhungen verstärktem Bemühungen, die Mineralölabhängigkeit zu reduzieren und Energie rationeller zu nutzen, haben in den letzten Jahren bereits dazu geführt, daß der Trend der 50er und 60er Jahre zu ständig steigenden Mineralölanteilen sich umgekehrt hat. Seit 1973, als das Mineralöl mit 55,2% zur Versorgung beitrug, ist sein Anteil rückläufig.

Abb. 11 zeigt, daß sich diese Entwicklung in allen Szenarien fortsetzt. Eindeutig ist der Trend zu einer ausgewogenen Versorgungsstruktur. Mineralöl bleibt



**Abb. 10: Entwicklung des Verbrauchs an Primärenergieträgern von 1950 bis 1980**

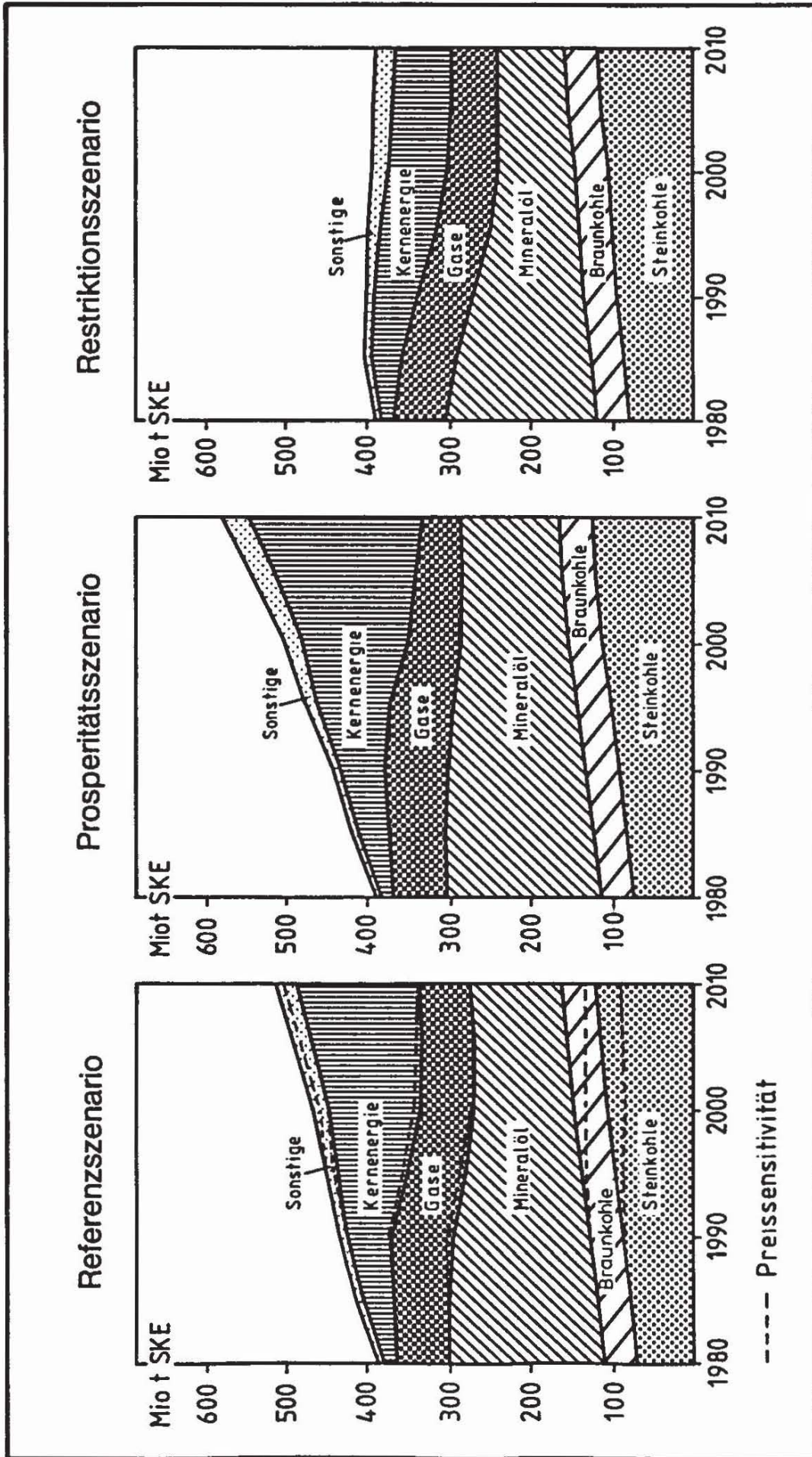


Abb. 11: Entwicklung des Verbrauchs an Primärenergieträgern in den Szenarien

weiterhin ein wichtiger Bestandteil der Energieversorgung, wird in seiner Vorrangstellung aber durch Kohle und/oder Kernenergie abgelöst. Selbst bei nur moderat steigenden Ölpreisen, wie sie in der Preissensitivität zum Referenzszenario unterstellt sind, geht der Mineralölverbrauch bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes um fast 30% zurück. Der Steinkohleeinsatz nimmt in diesem Fall weniger stark zu. Entsprechend der szenariospezifischen Annahme, den Kernkraftwerksausbau auf die heute in Betrieb und im Bau befindlichen Anlagen zu beschränken, bleibt der Beitrag der Kernenergie im Restriktionsszenario mit weniger als 70 Mio. t SKE gering, während er in den anderen Szenarien deutlich höher ist. Im Prosperitätsszenario, wo der Kernkraftwerksausbau keinen politischen Restriktionen unterworfen ist, erreicht die Kernenergie im Jahre 2010 einen Versorgungsanteil von 36%. Erdgas behauptet seine Marktposition; nur im Szenario Prosperität wird es nach 2000 durch kostengünstigeres SNG aus Kohle teilweise verdrängt.

Der Beitrag der „Sonstigen“-Energieträger, worunter auch die Sonnen- und Umgebungsenergie subsummiert sind, nimmt zwar in allen Szenarien zu, steigt aber selbst nach 2000 nicht über 5% an.

Neben den Strukturänderungen bezüglich der Versorgung mit Primärenergieträgern ist die Entwicklung in allen Szenarien auch durch Veränderungen auf der Verbrauchsseite gekennzeichnet.

Wie aus Tab. 4 zu entnehmen, steigt der Endenergieverbrauch insgesamt langsamer an als der Primärenergieverbrauch, was auf einen steigenden Umwandlungseinsatz in den Bereichen Stromerzeugung und Kohleveredlung zurückzuführen ist. Aber auch zwischen den drei endenergieverbrauchenden Bereichen Industrie, Haushalte und Kleinverbraucher<sup>1)</sup> und Verkehr vollziehen sich strukturelle Verschiebungen. In den letzten Jahren hat sich der Sektor Haushalte und Kleinverbraucher zum größten Endenergieverbraucher entwickelt, doch wird sein Anteil in der Zukunft zurückgehen. In einigen Szenarien übersteigt der Endenergieverbrauch der Industrie am Ende des Betrachtungszeitraumes wieder den Verbrauch des Sektors Haushalte und Kleinverbrauch. Trotz einer insgesamt weiter wachsenden Verkehrsleistung in allen Szenarien nimmt der Anteil des Verkehrssektors am Endenergieverbrauch ab. Eine ausführliche Erläuterung der diese Entwicklung bestimmenden Faktoren wird im nächsten Kapitel gegeben.

### **Haushalte und Kleinverbraucher**

Die privaten Haushalte, aber auch die Kleinverbraucher setzen den überwiegenden Teil der Energie für die Deckung des Raumwärmebedarfs ein (siehe Abb. 12). Im Jahre 1978 waren dies etwa 81% bei den privaten Haushalten und fast 60% bei den Kleinverbrauchern. Weitere 11% des Energieeinsatzes

---

<sup>1)</sup> Unter dem Begriff Kleinverbraucher sind hier Landwirtschaft und Gartenbau, Kleingewerbe in Handwerk und Industrie, Handel, Dienstleistungen, öffentliche Einrichtungen und Verwaltungen u. a. m. zusammengefaßt.

**Tab. 4:  
Energieverbrauch nach Sektoren**

	Referenzszenario				Prosperitätsszenario				Restriktionsszenario				Preissensitivität zum Referenzszenario											
	80	85	90	95	00	85	90	95	10	85	90	95	10	85	90	95	00	10						
Mio t SKE	80	269	274	275	277	296	296	296	331	295	287	287	295	331	261	254	245	237	236	269	275	276	280	299
Endenergie <sup>1)</sup>	261	(96)	(102)	(105)	(111)	(129)	(96)	(101)	(106)	(110)	(106)	(106)	(110)	(130)	(92)	(91)	(91)	(90)	(94)	(96)	(102)	(105)	(111)	(129)
- Industrie	112	(113)	(115)	(115)	(112)	(112)	(114)	(117)	(121)	(123)	(121)	(121)	(123)	(135)	(111)	(109)	(104)	(99)	(94)	(113)	(116)	(116)	(114)	(114)
- H u K	61	(60)	(57)	(55)	(54)	(55)	(60)	(58)	(60)	(62)	(60)	(60)	(62)	(66)	(58)	(54)	(50)	(48)	(48)	(60)	(57)	(55)	(55)	(56)
- Verkehr <sup>1)</sup>	27	33	36	39	42	48	34	39	42	46	42	46	55	55	32	34	35	39	41	33	36	39	42	48
Nichtenergie V Umwandlung	106	115	127	138	150	170	114	128	148	163	148	163	196	196	110	114	121	120	116	115	127	139	144	163
Primärenergie <sup>1)</sup>	394	417	437	452	469	514	419	443	477	504	477	504	582	403	402	401	396	393	417	438	454	466	510	510
% Struktur	66	64	63	61	59	58	64	62	60	59	60	60	57	65	63	61	60	60	60	64	63	61	60	59
Endenergie	34	(36)	(37)	(38)	(40)	(44)	(36)	(37)	(37)	(37)	(37)	(37)	(39)	(35)	(36)	(37)	(38)	(38)	(40)	36	37	38	(40)	(43)
- Industrie	43	(42)	(42)	(42)	(40)	(38)	(42)	(42)	(42)	(42)	(42)	(42)	(41)	(43)	(43)	(42)	(42)	(42)	(40)	42	42	42	(41)	(38)
- H u K	23	(22)	(21)	(20)	(20)	(18)	(22)	(21)	(21)	(21)	(21)	(21)	(20)	(22)	(22)	(21)	(21)	(20)	(20)	22	21	20	(20)	(19)
- Verkehr	7	8	8	8	9	9	8	9	9	9	9	9	9	8	8	9	9	10	10	8	8	8	9	9
Nichtenergie V Umwandlung	27	28	29	31	32	33	28	29	31	32	31	32	34	27	29	30	30	30	28	28	29	31	31	32

<sup>1)</sup> Zahlen enthalten auch die Hochseebunkerungen

in den privaten Haushalten dienen der Warmwasserbereitung, den Rest teilen sich die Verwendungszwecke Licht, Kraft, Kühlung, Kochen und Trocknen. Bei den Kleinverbrauchern ist naturgemäß der Anteil des Energieeinsatzes für die Prozeßwärme- und Kraftherzeugung mit etwa 16% bzw. 10% größer als im privaten Bereich. Für die Warmwasserbereitung werden etwa 8,5% der Energie verbraucht, gefolgt vom Licht mit 5,9% und der Kühlung mit weniger als 2%.

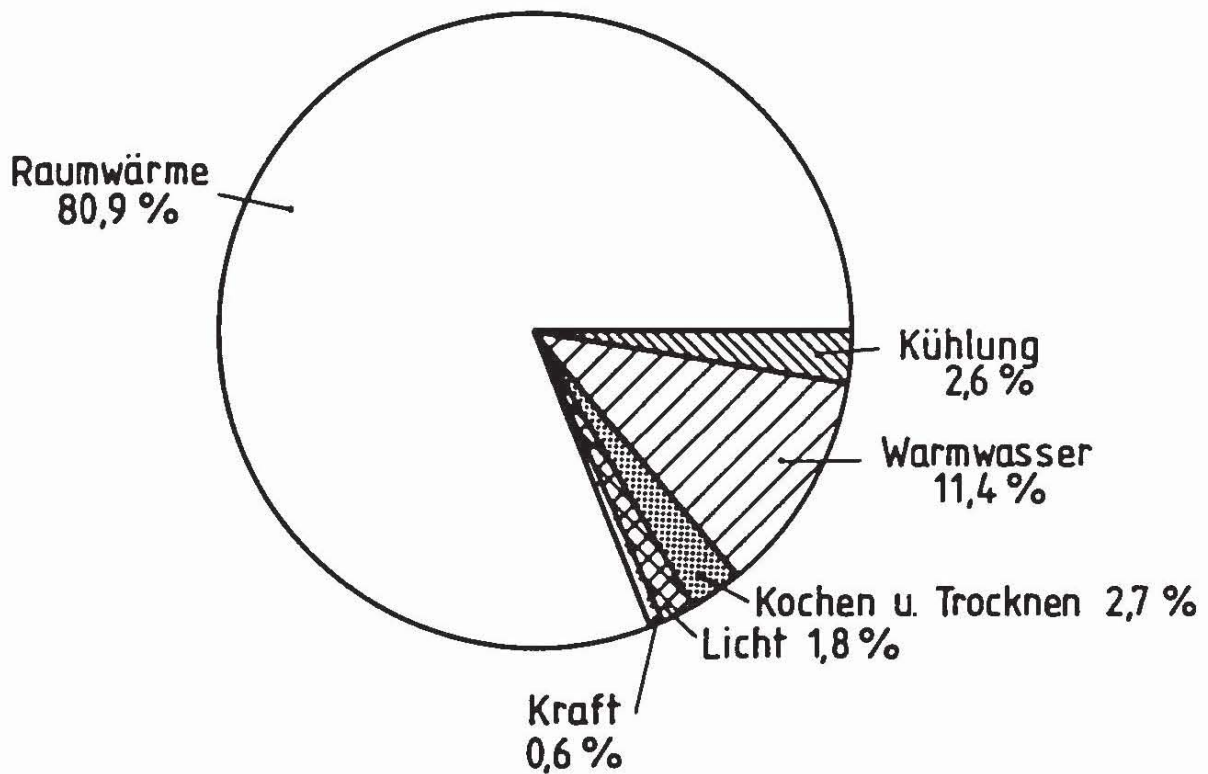
Die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher ist in allen Szenarien durch die Realisierung weitreichender Maßnahmen zur Energieeinsparung gekennzeichnet, die ihren wesentlichen Impuls durch die weiter steigenden Energiepreise erhalten.

Die privaten Haushalte gleichen den Energiemehrverbrauch, der von größeren Wohnflächen und höheren Komfortansprüchen ausgeht, durch langfristig effizientere Heizungssysteme und bessere Wärmedämmung mehr als aus. Einer maximalen Steigerung der Gesamtwohnfläche von 28% stehen drastische Energieeinsparungen bei der Raumheizung bis zu 40% in Szenario Prosperität gegenüber. Im Kleinverbrauchssektor werden Einsparungen in ähnlicher Größenordnung bei der Wärmeversorgung erzielt. Allerdings kann der energieverbrauchssteigernde Einfluß einer höheren wirtschaftlichen Aktivität nur im Szenario Restriktion, das ein deutlich niedrigeres Wirtschaftswachstum aufweist, kompensiert werden.

In Zukunft stehen für den Sektor Haushalte und Kleinverbraucher einschneidende Änderungen der Energieträgerstruktur bevor (siehe Abb. 13). Auffallendstes Ergebnis der Szenariorechnungen ist die drastische Verringerung der Verwendung von Mineralölprodukten, im wesentlichen von leichtem Heizöl. Ausgehend von einem Verbrauchsanteil von 52% im Jahre 1980 fällt der Anteil in allen Szenarien bis zum Ende des Betrachtungszeitraums auf unter 15%. Auch in der Preissensitivitätsrechnung zum Referenzszenario stellt sich trotz eines wesentlich niedrigeren Preisniveaus eine Halbierung des Mineralöleinsatzes bis zum Jahre 2010 ein. Unterstützt wird die Substitution des leichten Heizöls durch die Entwicklung des Mineralölmarktes insgesamt. Wie in den nachfolgenden Kapiteln noch ausführlich erläutert, weitet sich die Marktposition der Mitteldestillate im Verkehrssektor sowohl anteilmäßig als auch absolut stark aus. Da sich gleichzeitig der Durchsatz durch die Rohöldestillation drastisch verringert und der niedrig-siedende Anteil an der Rohölausbeute wie z. B. das Naphta in der nichtenergetischen Verwendung seinen wichtigsten Markt findet, wird der Rückzug des leichten Heizöls aus dem Sektor der Haushalte und Kleinverbraucher erleichtert.

Die Ausweitung des Gasabsatzes im Haushalts- und Kleinverbrauchssektor ist erklärte Politik der Gasversorgungsunternehmen. Da der Absatz von Gasen zur Stromerzeugung stark rückläufig ist und die Wettbewerbsposition des Erdgases im Kesselbereich der Industrie durch die Kohle unter Druck gerät, bietet der Haushalts- und Kleinverbrauchssektor die einzige Möglichkeit einer Steigerung des Gasabsatzes. Die Szenariorechnungen ergeben, daß sich der

Energieverbrauch der Haushalte nach Verwendungszwecken  
 1978 : 70,4 Mio t SKE = 100 %



Energieverbrauch der Kleinverbraucher nach Verwendungszwecken  
 1978 : 42,1 Mio t SKE = 100 %

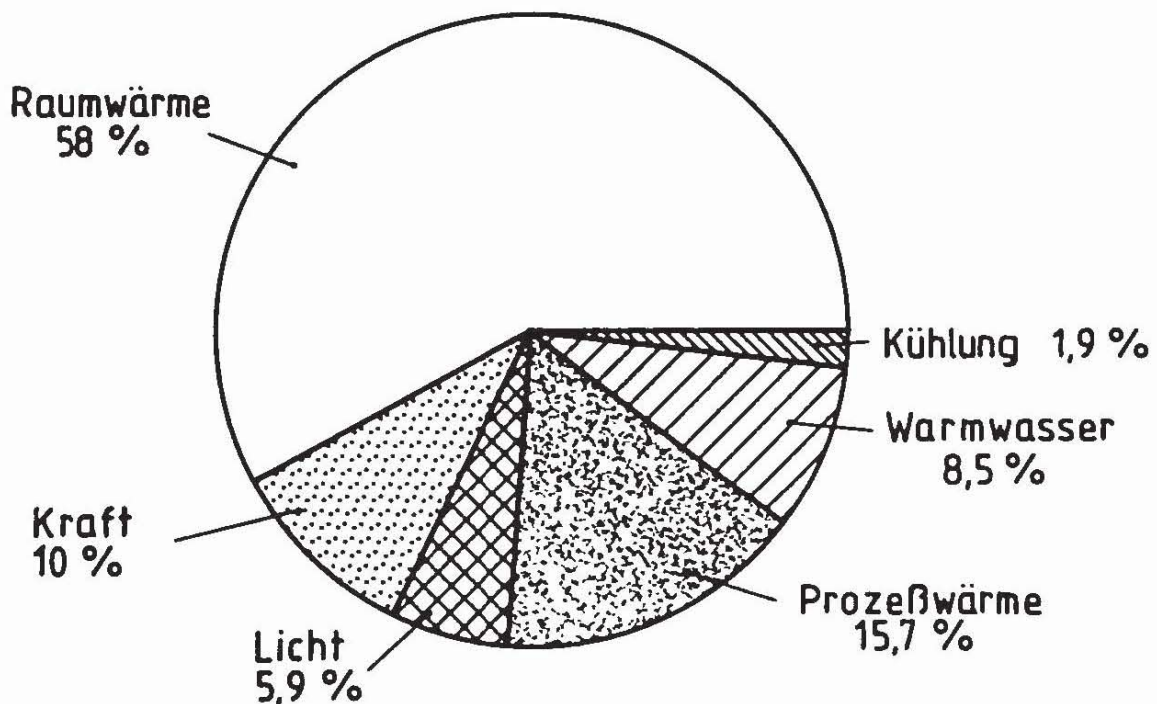


Abb. 12: Energieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher

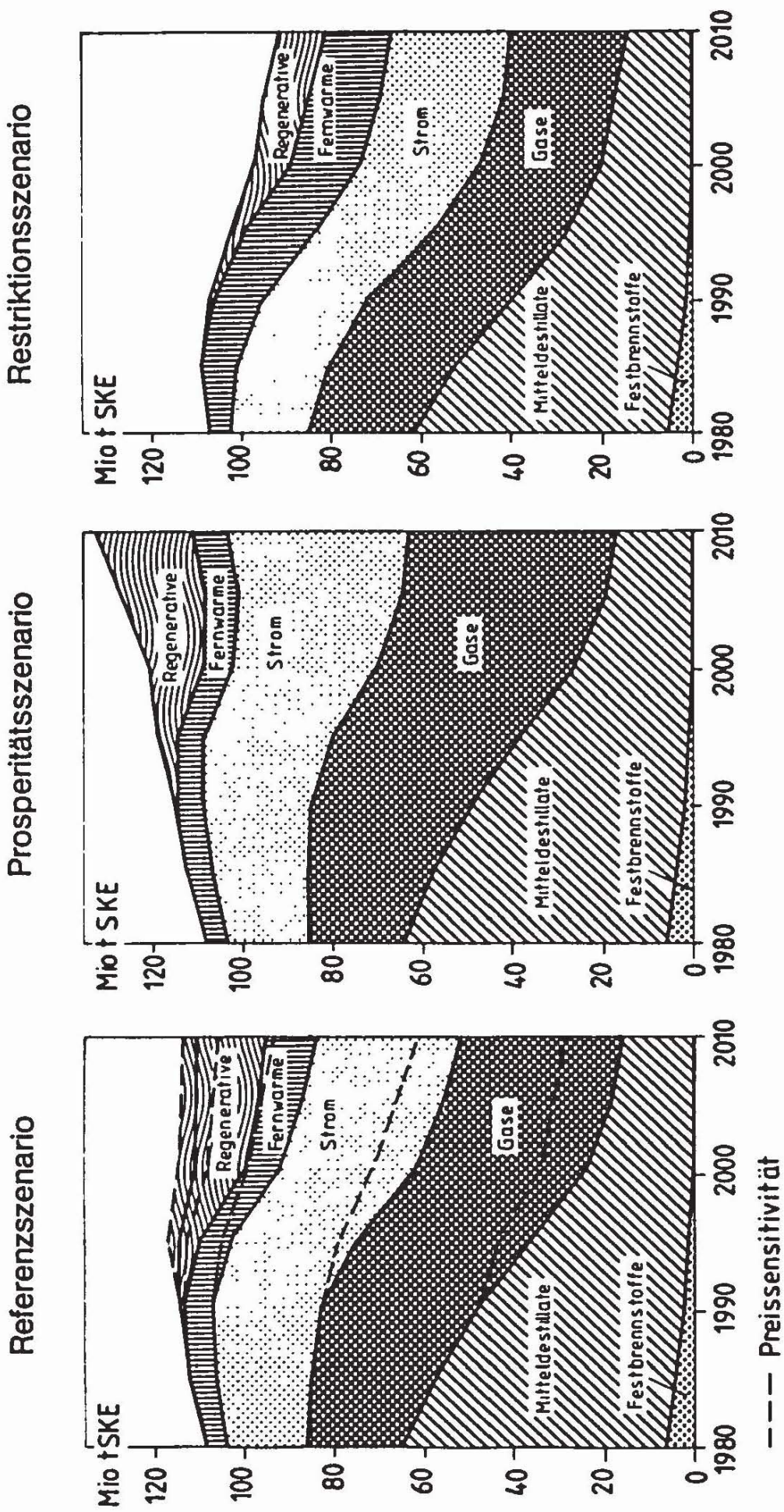


Abb. 13: Entwicklung der Energieträgergemachfrage im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher



Gasabsatz in diesem Verbrauchssektor insbesondere in Konkurrenz zum leichten Heizöl ausdehnen wird. Die Entwicklung im einzelnen ist sehr stark szenariospezifisch geprägt.

Den frühzeitigen und steilen Anstieg der Preise für die Importenergien Mineralöl und Erdgas nutzt die Fernwärme im Restriktionsszenario, um sich durch einen forcierten Ausbau fest im Wärmemarkt zu etablieren. Nach 1995 kommt bei stagnierenden Preisen für Erdgas und leichtes Heizöl der Ausbau der Fernwärmenetze zum Stillstand. Durch zusätzliche Anschlüsse in schon mit Fernwärme versorgten Gebieten steigt der Fernwärmeabsatz dann nur noch geringfügig. In den anderen Szenarien ist der Ausbau der Fernwärme wesentlich geringer. Dies ist zum einen auf die während der 80er Jahre langsamer ansteigenden Erdöl- und Erdgaspreise und zum anderen auf einen vermehrten Einsatz von Wärmepumpen-Heizungen zurückzuführen.

Im Stromverbrauch zeigen sich zunächst keine gravierenden Unterschiede in den Szenarien. In allen Szenarien erreicht die Stromnachfrage bis 1995 einen Zuwachs von etwa 55–60%. Danach bestimmen im wesentlichen zwei Faktoren die unterschiedliche Entwicklung des Stromverbrauchs. Das ist zum einen der Stromverbrauch zur Raumwärmebereitstellung durch Nachtspeicherheizung und Wärmepumpen und zum anderen der Stromverbrauch, der in starkem Maße von der wirtschaftlichen Aktivität einzelner Kleinverbraucher abhängig ist. So resultiert die Dynamik des Stromverbrauchsanstiegs in Szenario Prosperität nach 1995 gerade daraus, daß Bauindustrie, Handel, Handwerk und vor allem industrieabhängige Kleinbetriebe vom starken Wirtschaftswachstum dieses Szenarios profitieren und viele Betriebsprozesse, z. B. Kraftanwendung, Automatisierung und Kühlung, einen ausgeweiteten Stromeinsatz erfordern. Der Stromanteil an der Endenergienachfrage des Sektors Haushalte und Kleinverbraucher schwankt im Jahre 2010 in den Szenarien nur zwischen 29 und 30,5%.

Neue Systeme, wie Solaranlagen, Elektro- und Verbrennungsmotorwärmepumpen, zur Bereitstellung von Warmwasser und Raumwärme profitieren wegen der relativ hohen Investitionskosten von einer starken Erhöhung des gesamten Energiepreisniveaus. Die ab 1995 deutlich höheren Preise im Sze-

**Tab. 5:**  
**Struktur der Heizungssysteme im Haushalt und Kleinverbrauch**

% Struktur Systeme	Referenzszenario			Prosperitäts-szenario			Restriktions-szenario			Preissensitivität z. Referenzszenario		
	1995	2000	2010	1995	2000	2010	1995	2000	2010	1995	2000	2010
Sonne <sup>1)</sup>	1,1	2,4	1,1	1,1	2,7	1,1	1,8	2,4	1,6	-	-	-
Wärmepumpe-Strom	2,3	5,4	10,0	2,4	6,9	12,9	1,1	2,0	3,1	2,9	4,1	8,1
Verbrennungsmotor-wärmepumpe <sup>2)</sup>	4,9	13,0	21,6	4,7	12,1	23,4	1,6	4,5	12,0	1,1	6,7	10,2
konvent. Systeme	91,7	79,2	67,3	91,8	78,3	62,6	95,5	91,1	83,3	96,0	89,2	81,7

<sup>1)</sup> ausschließlich Warmwasserbereitung

<sup>2)</sup> ausschließlich Absorptionswärmepumpe

nario Prosperität gegenüber dem Restriktionsszenario erklären den hohen Anteil neuer Systeme von mehr als einem Drittel gegenüber dem vergleichsweise niedrigen Anteil von 17 % im Szenario Restriktion (siehe Tab. 5).

Unter den neuen Systemen erlangt die Solaranlage mit maximal 2–3% keine große Bedeutung. Bei den Wärmepumpensystemen erreichen die Verbrennungsmotorwärmepumpen in allen Szenarien einen höheren Marktanteil als die Elektrowärmepumpe.

Der Beitrag der regenerativen Energiequellen, worunter die direkt genutzte Solarenergie und die Umgebungswärme bilanziert sind, nimmt in allen Szenarien zu und erreicht im Prosperitätsszenario mit einem Anteil von 17 % seinen höchsten Wert. Dies ist auf den bereits erwähnten hohen Anteil von Wärmepumpen an der Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs zurückzuführen.

### **Industrie und nichtenergetischer Verbrauch**

Der Endenergieverbrauch der Industrie wird im wesentlichen bestimmt durch

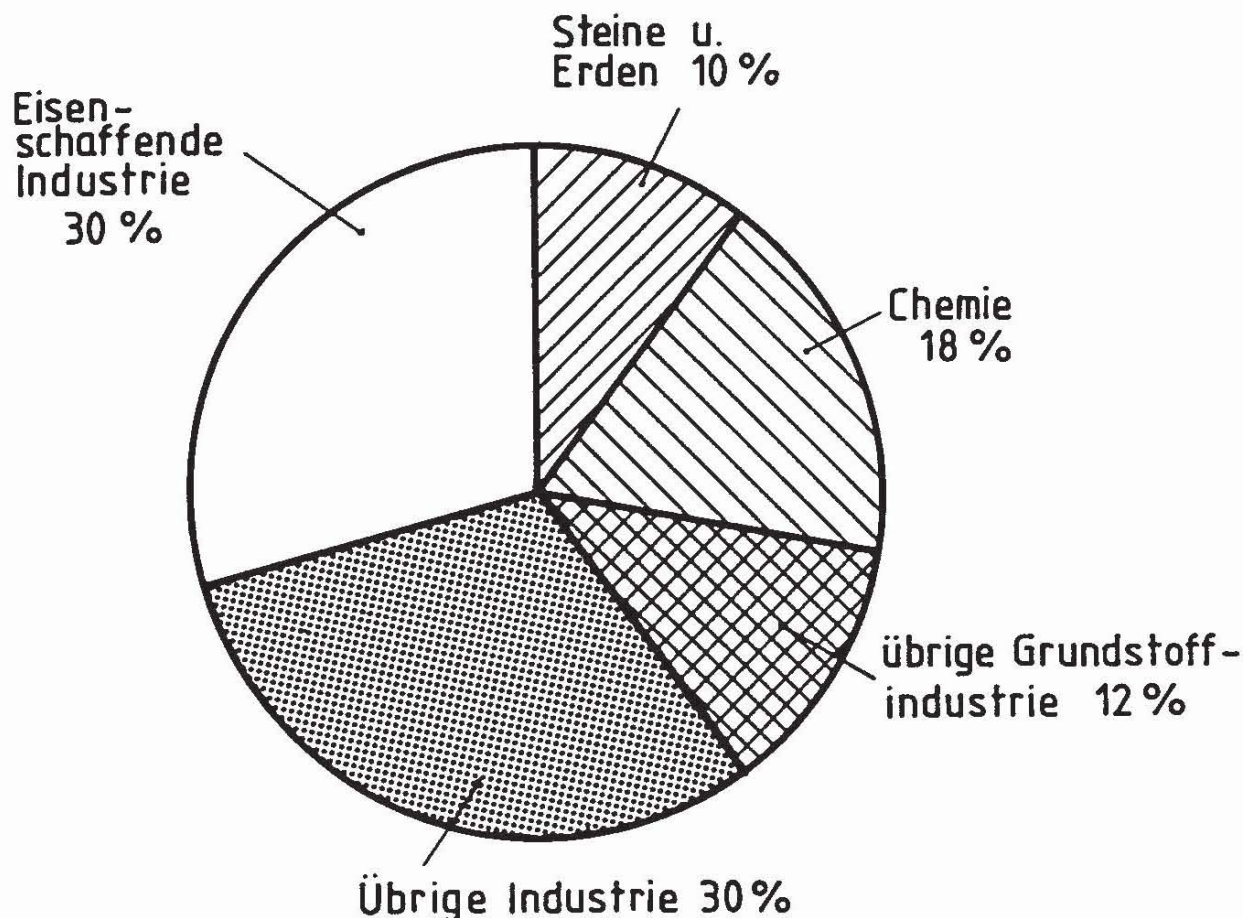
- die Menge der produzierten Güter
- die sektorale Branchenstruktur und
- den spezifischen Energieverbrauch pro Produktionseinheit,

wobei dieser auch von der Art der eingesetzten Energieträger abhängt. Im Jahr 1980 entfielen auf die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie 70% der Endenergienachfrage der Industrie (siehe Abb. 14). Dies entsprach 23,9% des gesamten Endenergieverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland. Die Investitionsgüter- und Verbrauchsgüterindustrie sowie das Nahrungs- und Genußmittelgewerbe verbrauchten nur rd. 30% der industriell genutzten Energie, obwohl ihr Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt mehr als doppelt so groß wie der der Grundstoffindustrie war. Mit einem Anteil von 30% war die Eisenschaffende Industrie der bedeutendste Energieverbraucher, gefolgt von der Chemie mit einem Anteil von 18%.

Das Streben nach rationeller Energienutzung war in der Industrie, insbesondere in energieintensiven Bereichen, schon immer ausgeprägt, so daß der spezifische Energieverbrauch in der Vergangenheit stetig abnahm. Bei steigenden Energiepreisen wird sich diese Entwicklung auch in der Zukunft fortsetzen. Dabei hängt der sich einstellende Rückgang des spezifischen Energieverbrauchs auch vom Wachstum der Investitionen und der Nettoproduktion ab, denn in Phasen kräftiger Expansion sind in der Regel die Investitionen in energiesparenden Maßnahmen und Anlagen höher als bei einer schwachen wirtschaftlichen Entwicklung.

Wie bereits erwähnt, nimmt in allen Szenarien die Bedeutung der Industrie als Energieverbraucher zu. Im einzelnen werden die Entwicklungen von den szenariospezifischen Wachstumsraten der Industrieproduktion und der industriellen Strukturentwicklung geprägt.

1980: 88 Mio t SKE = 100 %



**Abb. 14: Energienachfrage der Industrie im Jahre 1980**

Vergleicht man die Entwicklung des gesamten industriellen Endenergieverbrauchs im Referenzszenario mit dem im Prosperitätsszenario (siehe Abb. 15), so zeigt sich hier nach 1990 deutlich der Einfluß der Energiepreise. Das höhere Energiepreinsniveau des Szenarios Prosperität bewirkt weitergehende Anstrengungen zur Energieeinsparung, deren Durchführung durch die vergleichsweise hohen Wachstumsraten begünstigt wird, so daß sich hier, trotz einer erheblich höheren industriellen Nettoproduktion, nur etwa der gleiche Endenergieverbrauch wie im Referenzszenario einstellt.

Im Restriktionsszenario ist nur eine unwesentliche Steigerung des Endenergieverbrauchs gegenüber heute zu verzeichnen (siehe Abb. 15). Die Wachstumsraten der sektoralen Nettoproduktion sind in diesem Szenario gerade in den energieintensiven Sektoren der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie wesentlich niedriger als das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts. Daraus resultieren geringere Energieverbräuche als Folge sektoraler Strukturveränderungen. Dieser Struktureffekt und die insgesamt niedrigen Wachstumsraten führen trotz langsamerer technischer Innovation in der Gesamtindustrie zu einem wesentlich geringeren Endenergieverbrauch als in den anderen Szenarien.

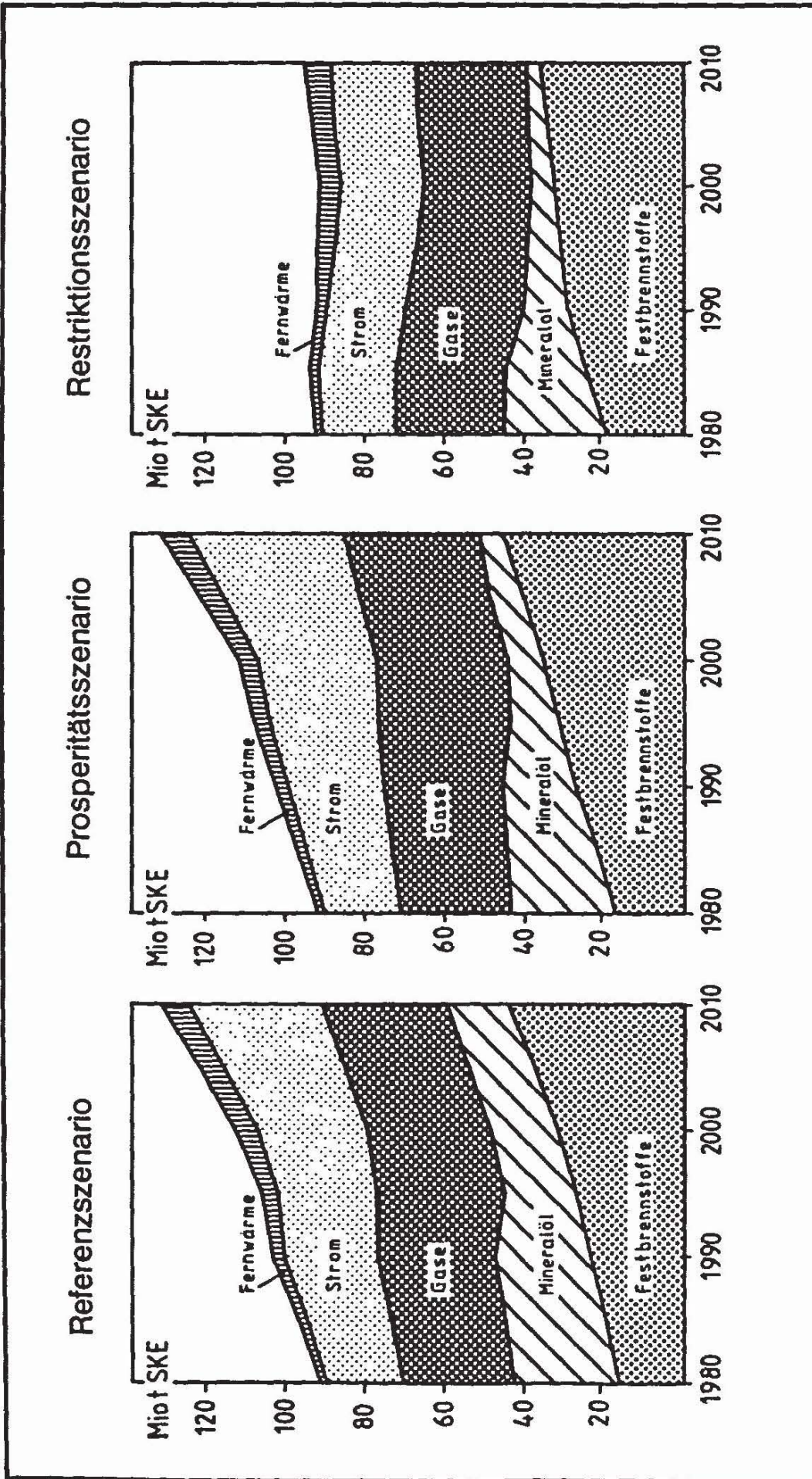


Abb. 15: Entwicklung des Endenergeträgerverbrauchs der Industrie

Alle Szenarien weisen in Anbetracht der deutlichen Preissteigerungen für Importenergien starke Veränderungen der Energieträgerstruktur auf. Der Einsatz von Mineralölprodukten ist stark rückläufig. Der Direkteinsatz von Steinkohle erfährt eine erhebliche Ausweitung. Strom kommt in sehr unterschiedlichem Umfang zum Einsatz; hier spielen szenariospezifische Randbedingungen z. B. hinsichtlich der Kernenergie, eine entscheidende Rolle.

Der umfangreiche Ausbau der Kernenergie in Szenario Prosperität ermöglicht eine kostengünstige Bereitstellung des Stromes, was die wesentliche Ursache für die Zunahme des industriellen Stromverbrauchs um 2,5%/a ist. Die günstigen Bedingungen für den Stromeinsatz tragen zur Reduktion des spezifischen Endenergieverbrauchs in diesem Szenario wesentlich bei.

Im Gegensatz zum Szenario Prosperität finden im Szenario Restriktion gerade die stromintensiven Grundstoffindustrien ungünstige Standortbedingungen in der Bundesrepublik vor und lagern teilweise ihre Produktion in Länder mit günstigeren Energie- und Rohstoffpreisen aus. Als Beispiele seien nur die Aluminiumindustrie, die PVC-Synthese und die Chlorkohlenwasserstoffherstellung genannt. Auch die geringe Kernkraftwerkskapazität steht einer stärkeren Ausweitung des industriellen Stromeinsatzes entgegen.

Bei den Gasen ist in allen Szenarien keine wesentliche Ausweitung der industriellen Marktposition zu beobachten. Ein rückläufiger Gaseinsatz im Kesselbereich kann durch eine Ausweitung der Gasverwendung in Bereichen, wo Gas Anwendungsvorteile besitzt, kompensiert werden.

Die Steigerung des als Fernwärme bilanzierten Energieträgers resultiert etwa je zur Hälfte aus einer Erhöhung der Bezüge aus der Fernwärmewirtschaft und aus dem industriellen Wärmeverbund auf der Basis eines kommerziellen Abwärmebezugs.

Es sei noch angemerkt, daß sich die Entwicklung der industriellen Energieträgerverbrauchsstruktur in der Preissensitivität zum Referenzszenario kaum von der im Referenzszenario unterscheidet. Sie ist deshalb in Abb. 15 nicht eingetragen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Substitution von Mineralölprodukten durch Kohle und in geringem Umfang durch Strom sich als ein stabiler Entwicklungstrend durch alle Szenarien zieht.

Bedeutendster Bestimmungsfaktor für den nichtenergetischen Verbrauch ist die Nachfrage der chemischen Industrie nach Energieträgern als Rohstoff. Im Prinzip ist davon auszugehen, daß im Betrachtungszeitraum die Vorteile integrierter Chemieproduktion, die Einbindung in eine enge industrielle Verflechtung sowie Forschungsintensität und Humankapital als Standortfaktoren ihre Gültigkeit behalten und damit ein weiteres Wachstum des nichtenergetischen Verbrauchs induzieren.

Der Aufbau einer eigenen petrochemischen Industrie in rohstoffreichen Schwellenländern, im Ostblock, sowie in ölexportierenden Staaten wird aber die Entwicklung der chemischen Industrie in unserem Land beeinflussen. So ist davon auszugehen, daß im verstärkten Maße petrochemische Vorprodukte importiert werden. Dies führt ebenso wie Veränderungen in der Produktionsstruktur dazu, daß die Nachfrage der chemischen Industrie nach energetischen Rohstoffen pro Nettoproduktionseinheit zurückgehen wird. Der Rohstoffeinsatz dürfte aber auch in Zukunft durch Mineralölprodukte geprägt sein, bei einem allerdings steigenden Anteil von Kohlenwertstoffen und Synthesegasen.

Der übrige nichtenergetische Verbrauch umfaßt vor allem den Schmieröl- und Schmiermittelverbrauch und den Verbrauch an Bitumen im Baugewerbe, Straßenbau und in der Industrie. Hier ist z. B. wegen des reduzierten Ausbautempos im Straßenbau und wegen der Verlängerung der Ölwechselintervalle mit einer stagnierenden Nachfrage zu rechnen.

Insgesamt nimmt jedoch der nichtenergetische Verbrauch in allen Szenarien zu. Er steigt von 27,4 Mio. t SKE im Jahre 1980 auf 41 Mio. t SKE im Restriktionsszenario, bzw. 55 Mio. t SKE im Prosperitätsszenario bis zum Jahre 2010 an.

## **Kapitel 7: Der Kraftstoffmarkt vor einer Wende**

Primäres Ziel des Projektes „Energie für den Verkehr“ ist es, die Perspektiven verschiedener Antriebssysteme und alternativer Kraftstoffe für den Verkehrssektor, im Kontext der gesamt- und energiewirtschaftlichen Entwicklungstendenzen zu untersuchen. Wie die in diesem Kapitel erläuterten Ergebnisse zeigen, steht die Energieversorgung des Verkehrssektors vor einem weitreichenden Strukturwandel.

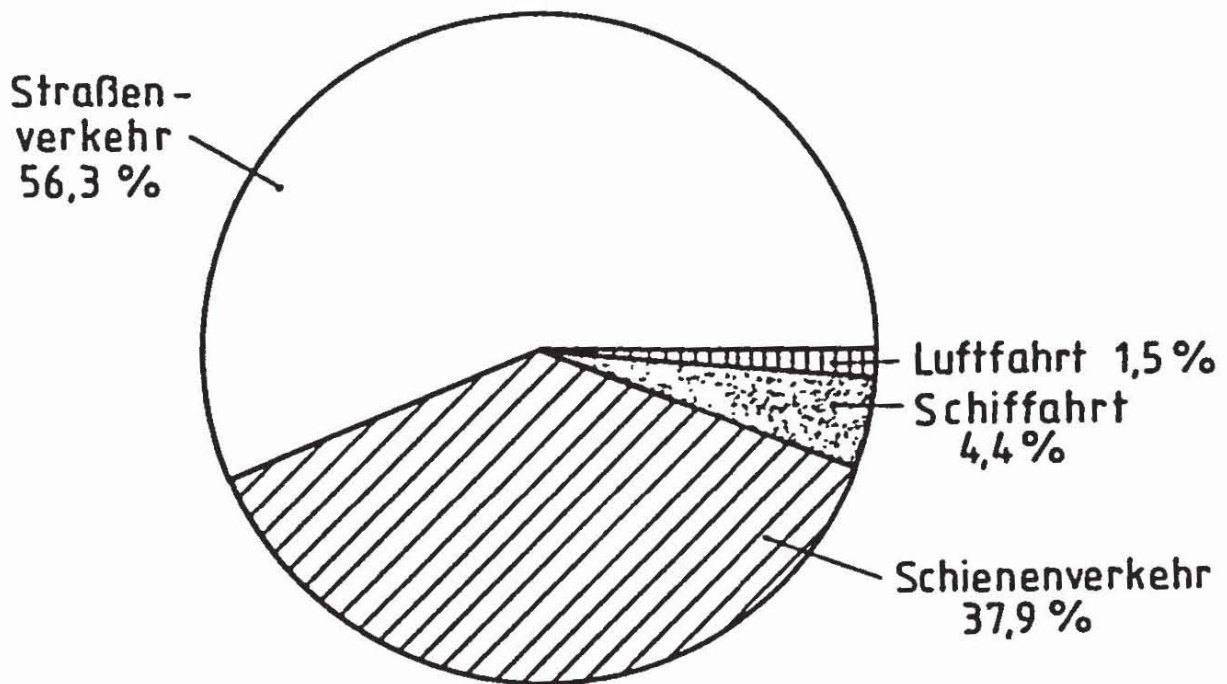
Die Entwicklung der Endenergienachfrage im Verkehrssektor war in der Vergangenheit, neben der Zunahme der Güter- und Personenverkehrsleistung, vor allem durch eine erhebliche Ausweitung des Straßenverkehrs gekennzeichnet. Wie aus Abb. 16 zu ersehen, führte dies dazu, daß der Anteil des Schienenverkehrs am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors von fast 38 % im Jahre 1960 auf 4,4 % im Jahre 1980 zurückging. Im gleichen Zeitraum stieg der Verbrauchsanteil des Straßenverkehrs von ca. 56 % auf ca. 87 % an. Dabei nahm der Energieverbrauch des Pkw-Bereichs besonders stark zu. Im Jahre 1950 fuhren in der Bundesrepublik Deutschland ca. 500 000 Personenkraftwagen, d. h. auf etwa 95 Bürger kam ein Pkw. Bis 1980 ist die Zahl der Personenkraftwagen auf über 23 Mio. angestiegen, so daß heute rein rechnerisch ein Pkw auf 2,3 Personen kommt. Gegenwärtig entfallen ca. 60 % des Endenergieverbrauchs im Sektor Verkehr auf Personenkraftwagen.

Hat, wie zuvor erläutert, der Anteil des Straßenverkehrs am Endenergieverbrauch des Sektors Verkehr in der Vergangenheit stetig zugenommen, so zeigen die Rechnungen für die Zukunft eine Umkehr dieses Trends an (siehe Abb. 17). In allen Szenarien ist der Anteil des Energieverbrauchs von Personen- und Lastkraftwagen und Bussen rückläufig. Wesentliche Ursache für diese Entwicklung ist der starke Rückgang des spezifischen Energieverbrauchs der Pkw, der trotz wachsender Pkw-Verkehrsleistung im Referenz- und Prosperitätsszenario zu einem erheblichen Absinken des Energieverbrauchs im Pkw-Bereich führt. Auch der mit der stark zunehmenden Straßengüterverkehrsleistung einhergehende Energiemehrverbrauch dieses Bereichs kann den Anteilsrückgang des Straßenverkehrs nicht kompensieren. Im Szenario Restriktion wird dieser Strukturwandel noch durch den szenariospezifisch höheren Anteil des Öffentlichen Personenverkehrs gefördert. Hier geht der Energieverbrauchsanteil des Personenindividualverkehrs auf 34 %, d. h. auf gut die Hälfte seines heutigen Verbrauchsanteils, zurück.

Diese relativen Verschiebungen zwischen dem Energieverbrauch der verschiedenen Verkehrsträger deuten schon darauf hin, daß sich auch die Energieträgerstruktur des Verkehrssektors verändern wird.

In Abb. 18 ist die Entwicklung der Energienachfrage für den Verkehrssektor nach Energieträgern dargestellt. Die Zahlen in Abb. 18 enthalten auch die Bunkerungen der Hochseeschifffahrt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen weisen in allen Szenarien eine Entkopplung zwischen der Verkehrsleistung

1960: 22,5 Mio t SKE = 100 %



1980: 56,8 Mio t SKE = 100 %

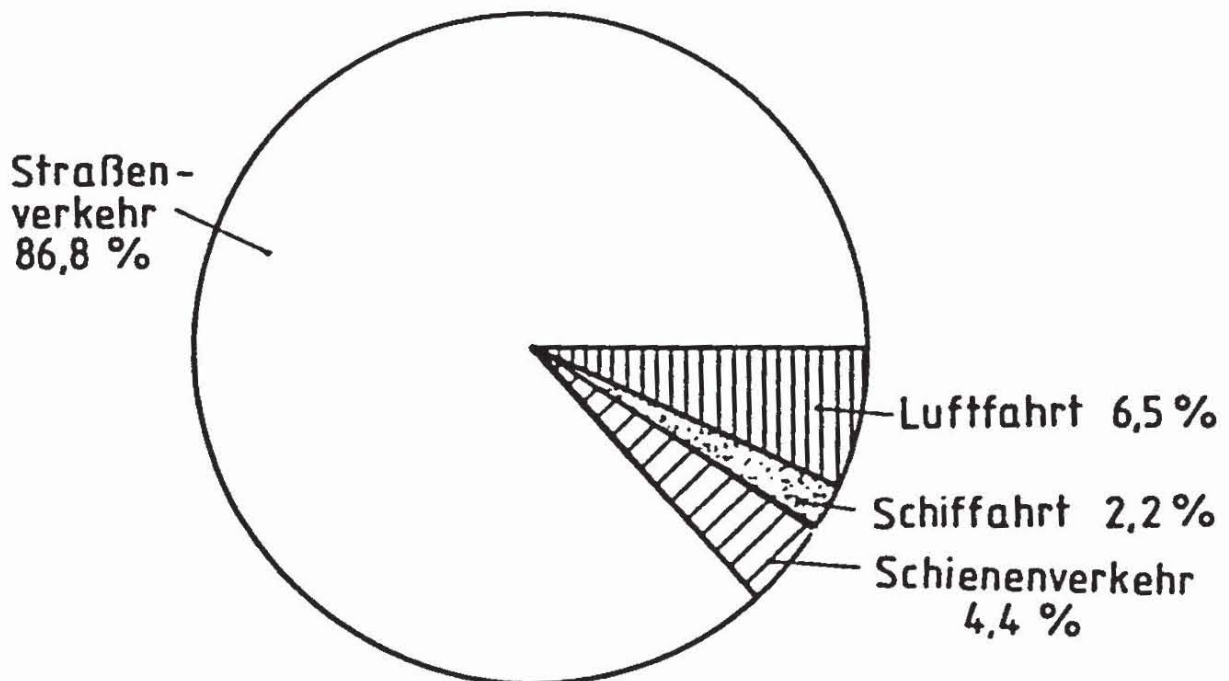


Abb. 16: Endenergieverbrauch des Verkehrssektors nach Verkehrsträgern



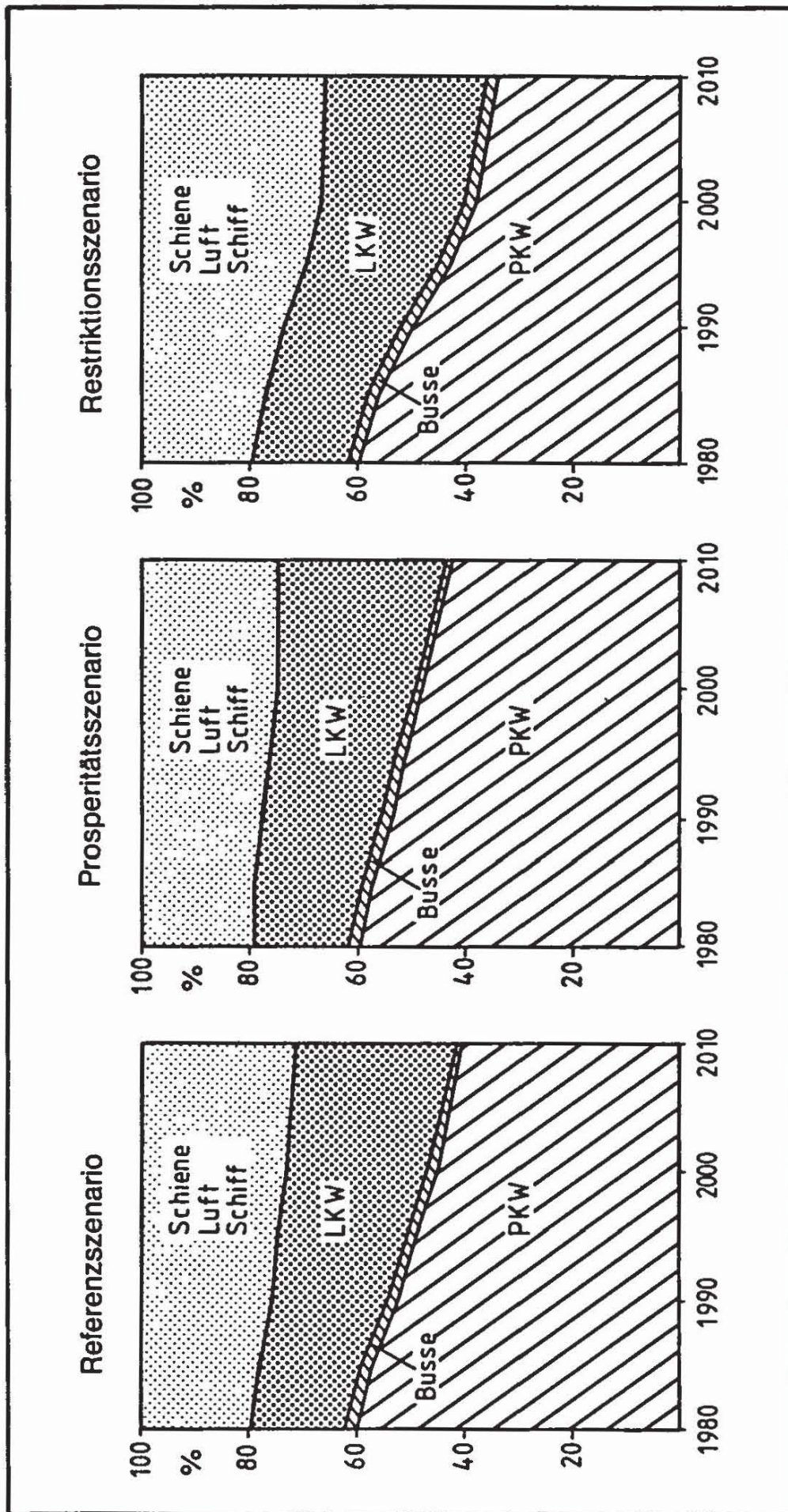


Abb. 17: Entwicklung der Endenergieverbrauchsstruktur nach Verkehrsträgern

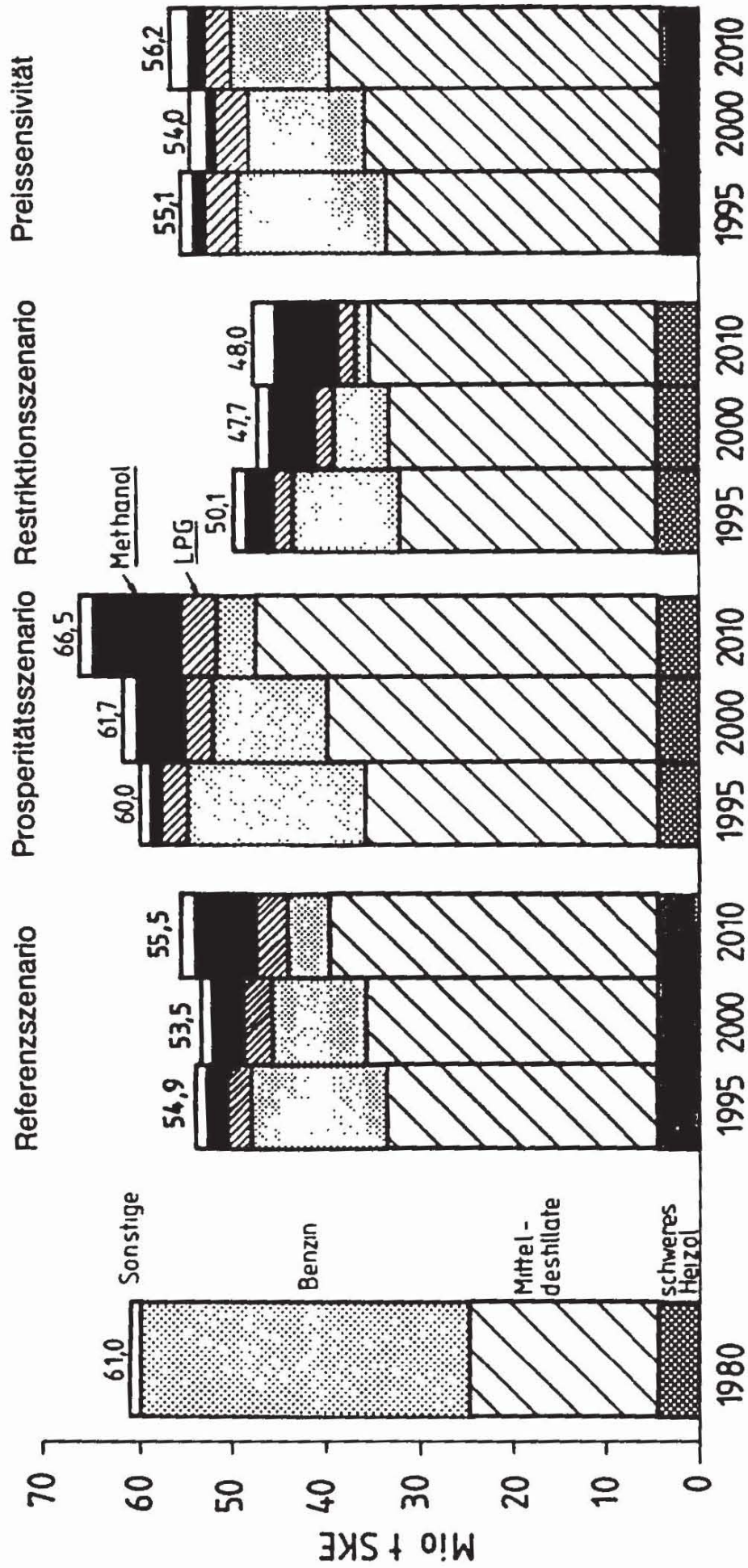


Abb. 18: Entwicklung der Energieträgergemachfrage des Verkehrssektors

und der Endenergienachfrage aus. Im Referenzszenario geht der Endenergieverbrauch bereits Mitte der neunziger Jahre auf etwa 55 Mio. t SKE zurück und stagniert auf diesem Niveau. Im Fall der Preissensitivität zum Referenzszenario stellen sich geringfügig höhere Werte ein. Im Restriktionsszenario ist der Energieverbrauch aufgrund der geringeren Verkehrsleistungen mit 48 Mio. t SKE im Jahre 2010 noch niedriger. Allein im Prosperitätsszenario kann die Verbesserung der spezifischen Kraftstoffverbräuche die mit wachsender Verkehrsleistung zunehmende Energienachfrage nicht kompensieren, so daß hier bis zum Ende des Betrachtungszeitraums der Endenergieverbrauch um ca. 10% anwächst.

Die Energieversorgung des Sektors Verkehr ist heute zu über 95% vom Mineralöl abhängig. Trotz der in den Szenarien unterstellten Ölpreissteigerungen wird sich an diesem Sachverhalt grundsätzlich wenig ändern. In den Szenarien geht der Mineralölproduktanteil zwar zurück, mit über 80% bleibt er aber weiter dominant.

Dennoch steht der Verkehrssektor in seiner Energieträgerstruktur vor einschneidenden Veränderungen, insbesondere bei den Mineralölprodukten. Mitteldestillate – hierunter ist auch der Kerosineinsatz im Luftverkehr erfaßt – werden ihren Versorgungsanteil von heute einem Drittel auf zukünftig zwei Drittel ausdehnen. Zurückzuführen ist dies vor allem auf eine starke Ausweitung der Nachfrage im Straßengüterverkehr und im Personenindividualverkehr. Eine bemerkenswerte Entwicklung zeigen die Modellrechnungen beim Benzin, sei es als ungemischter Ottokraftstoff oder als Bestandteil von Mischkraftstoffen. Von heute ca. 57% der Endenergienachfrage des Verkehrssektors reduziert sich der Benzinanteil auf bis zu 4% im Restriktionsszenario im Jahre 2010.

Da in diesem Szenario der gesamte Endenergieverbrauch des Verkehrssektors rückläufig ist, werden im Jahre 2010 nur noch 1,6 Mio. t SKE Raffinerie-Benzin eingesetzt. Im Referenz- und Prosperitätsszenario ist der Benzinanteil am Ende des Betrachtungszeitraums mit 7% bzw. 6%, d. h. 4 bzw. 3,7 Mio. t SKE, zwar höher, aber im Vergleich zum Verbrauch des Jahres 1980 in Höhe von 35 Mio. t SKE sehr niedrig. Die bei der Preissensitivitätsrechnung zum Referenzszenario zugrunde gelegten moderaten Ölpreissteigerungen bewirken eine zwar langsamere aber dennoch beachtliche Benzinsubstitution. Da in diesem Fall die Erzeugung von Methanol aus Kohle nicht wirtschaftlich ist, geht der Benzinverbrauch nur auf 28% des heutigen Wertes zurück.

Der starke Substitutionsdruck, dem das Benzin ausgesetzt ist, resultiert im wesentlichen aus dem ungünstigeren Fahrzeugnutzungsgrad im Vergleich zu den anderen Kraftstoffen. Weitere Nachteile zum LPG (liquefied petroleum gas) und Dieselkraftstoff ergeben sich im Raffineriebereich, wenn eine höhere Ausbeute an Benzin nur über Konversionsanlagen, d. h. bei zusätzlichen Kosten und Energieverlusten zu erzielen ist.

Eine zunehmende Bedeutung unter den Energieträgern im Verkehrsbereich gewinnt in den Rechnungen das LPG. Jüngste Preissignale aus einigen OPEC-Ländern signalisieren, daß die Wettbewerbsfähigkeit des LPG auch langfristig erhalten bleibt. Engpässe in der Entwicklung liegen vielmehr im Aufbau der notwendigen Infrastruktur und in der Mengenverfügbarkeit.

Einzig nicht ölgebundene Versorgungsalternative mit wirtschaftlicher Bedeutung ist bei den Szenarien zugrundegelegten Preisentwicklungen das Methanol. Entscheidende Rahmendaten werden hier durch die Preisrelationen von Kohle und Mineralöl zueinander gesetzt. Unter ökonomischen Gesichtspunkten fallen auch relativ geringe Zusatzkosten beim Fahrzeug und ein deutlich günstigerer Wirkungsgrad zugunsten des Methanols ins Gewicht. Der Methanoleinsatz ist jedoch eindeutig von der Versorgungsseite her limitiert. Die heute in der Bundesrepublik installierte Kapazität in Methanolanlagen beträgt etwa 1 Mio. t/a, die vorwiegend in der Chemie zum Einsatz kommen. Geringe Teilmengen werden bereits heute in einem Umfang von 2–3 Vol-% durch einige Mineralölfirmer dem Benzin zugemischt.

In allen Szenarien wird Methanol aus heimischer Kohle erzeugt. Lediglich in der Preissensitivität zum Referenzszenario, wo ein im Vergleich zum Ölpreis hoher Kohlepreis (Preisparität 70%) unterstellt wird, ist eine Methanolerzeugung aus heimischer Kohle nicht wirtschaftlich. Die geringen Mengen an Methanol in Höhe von 1 Mio. t SKE, die hier eingesetzt werden, stammen aus Importen. Die Erzeugung anderer synthetischer Kraftstoffe aus Kohle, z. B. mittels Kohleverflüssigung oder nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren, kommt aufgrund der Einsatzvorteile des Methanols im Fahrzeug und höherer Kosten ebenso wenig zum Tragen wie die Benzinsynthese aus Methanol über den Mobil-Prozeß.

Der Einsatz sonstiger Energieträger wie Strom, Kohle und Erdgas bleibt auf spezielle Einsatzgebiete, wie z. B. elektrische Schienenfahrzeuge, beschränkt und ist mengenmäßig nur von geringer Bedeutung.

### **Personenindividualverkehr**

Wie oben ausgeführt, werden die zuvor erläuterten Entwicklungen des Endenergieverbrauchs im Sektor Verkehr entscheidend von den Entwicklungen im Pkw-Bereich geprägt. Da diesem Bereich somit eine besondere Bedeutung zukommt, sollen zunächst einige der wesentlichen Annahmen und Daten, die den Untersuchungen zugrundegelegt sind, sowie der Detaillierungsgrad der modellmäßigen Abbildung dieses Bereichs erläutert werden, bevor auf die Ergebnisse eingegangen wird<sup>1)</sup>.

Im Rahmen der Untersuchung wird zwischen drei Pkw-Klassen, nämlich einer Unterklasse, der Mittelklasse und der Oberklasse differenziert. Um insbeson-

<sup>1)</sup> Eine vollständige Darstellung der Rahmendaten und Annahmen findet sich im FAT-Bericht Nr. 25.

dere die Marktchancen von Antriebskonzepten mit einer geringen Reichweite, wie z. B. die des Elektroantriebs realitätsnäher abschätzen zu können, wurde als weitere Fahrzeugkategorie das typische Stadtauto eingeführt. Seine jährliche Fahrleistung liegt mit ca. 6 000 km/a wesentlich niedriger als die in den drei anderen Klassen. Die Entwicklung der Anteile der verschiedenen Klassen am Pkw-Bestand sind szenariospezifisch vorgegeben, da eine Optimierung z. B. nach Fahrzeughaltungskosten wenig Sinn hat.

In jeder Klasse werden zwölf unterschiedliche Kraftstoffe betrachtet, sie sind in Tab. 6 zusammen mit den entsprechenden Antriebssystemen aufgelistet. Jeder Fahrzeugtyp in den Klassen wird durch die folgenden Größen charakterisiert:

- Fahrzeuganschaffungskosten (sie enthielten insbesondere die eventuellen Mehrkosten neuer Antriebskonzepte),
- zeitabhängiger spezifischer Kraftstoffverbrauch,
- durchschnittliche jährliche Fahrleistung.

Da alle Alternativkraftstoffe aufgrund ihrer geringeren Energiedichte und anderer kraftstoffspezifischer Eigenschaften beim Transport und bei der Verteilung gegenüber Benzin und Diesel Nachteile haben, die zu höheren Kosten führen, sind auch diese in den Rechnungen berücksichtigt worden.

Ein weiterer wesentlicher Faktor, der die Konkurrenz der verschiedenen Kraftstoffe untereinander beeinflusst, ist die Besteuerung. Die zukünftige Besteuerungspraxis läßt sich nicht vorhersagen. Für die im Rahmen des Projektes „Energie für den Verkehr“ durchgeführten Szenarienrechnungen ist unter-

**Tab. 6:  
Betrachtete Pkw-Antriebssysteme und Kraftstoffe**

Antriebssystem	Kraftstoff
Ottomotor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Benzin</li> <li>M 3</li> <li>M 15</li> <li>M 100</li> <li>E 15</li> <li>E 100</li> <li>LPG</li> <li>CNG</li> </ul>
Dieselmotor	Wasserstoff
Turbo-Dieselmotor	Diesel
Elektroantrieb (Batterie)	Diesel
	Strom

**Anmerkung:**  
Synthetische Benzine, wie z. B. das Mobil-Benzin, wurden anfangs berücksichtigt, später aber aufgrund der Szenarioergebnisse nicht weiter betrachtet.

stellt, daß alle Alternativkraftstoffe auf der Basis ihres Energiegehaltes wie Benzin besteuert werden. Für Dieselkraftstoff und LPG wird die Beibehaltung der gegenwärtigen Steuersätze angenommen.

Die für den Energieverbrauch im Pkw-Bereich wesentlichen Entwicklungstendenzen zeigt Abb. 19. In allen Szenarien geht der Endenergieverbrauch des Pkw zurück. Dies ist Resultat der Realisierung weitreichender Maßnahmen zur Reduzierung der spezifischen Kraftstoffverbräuche.

Die Fahrwiderstandsreduzierung und damit die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs wird im wesentlichen erreicht durch Verbesserung der Aerodynamik, einer Gewichtsverminderung und der Verringerung des Rollwiderstandes der Reifen. Auch die verstärkte Verwendung von Mikroprozessoren zur Überwachung des Betriebsverhaltens der Motoren sowie Maßnahmen bezüglich verbesserter Motor-Getriebe-Kombinationen lassen Einsparungen an Kraftstoff erwarten. Durch Weiterentwicklung am Motor und Getriebe selbst werden weitere Verbrauchsminderungen zu erzielen sein. Die in der FAT beteiligten Automobilfirmen schätzen, daß ein Oberklassefahrzeug des Modelljahres 2010 weniger Kraftstoff verbrauchen wird als ein Fahrzeug der Unterklasse im Modelljahr 1980.

Wie aus der Abb. 19 ersichtlich, fällt der Energieverbrauch gegen Ende des Betrachtungszeitraumes um durchschnittlich 46% geringer aus. Zur Ermittlung der Einsparung wurde der spezifische Verbrauchswert des Jahres 1980 mit der jeweiligen Verkehrsleistung multipliziert und dem tatsächlichen Energieverbrauch aufgrund der Modellergebnisse gegenübergestellt.

Die erheblichen Einsparungen gehen im wesentlichen zu Lasten des Benzins, das darüberhinaus noch einem starken Substitutionsdruck durch Dieselkraftstoff, LPG und Methanol ausgesetzt ist. Die Anschaffungskostenvorteile des Benzinfahrzeugs und die Vorteile des Benzins, die durch die bereits vorhandene Verteilungsinfrastruktur gegeben sind, können in den Modellrechnungen den eindeutigen Trend zu anderen Kraftstoffen mit günstigeren motorischen Eigenschaften nicht aufhalten. Auch bei einer für das Benzin insgesamt günstigeren Rohölpreisentwicklung, wie sie der Preissensitivität zum Referenzszenario zugrunde liegt, ergeben sich erhebliche Marktanteilsverluste für das Benzin. Gegenüber dem Referenzszenario wird hier kein Methanol auf Basis von Braun- und Steinkohle erzeugt, so daß Benzin die ausfallenden Methanolmengen ersetzen muß.

Nicht so eindeutig wie bei den vorgenannten Energieträgern sind die Entwicklungstendenzen beim Methanol. Marktpotentiale und Zeitpunkt der Markteinführung im Personenindividualverkehr werden im wesentlichen determiniert durch die Methanolverfügbarkeit, die entscheidend von den Szenarioannahmen abhängt. Die Kohle-Öl-Preisrelation ist der für eine inländische Methanolproduktion entscheidende Faktor. Aber auch ein mehr oder weniger starker Ausbau der Kernenergie beeinflußt über die damit aus der Stromerzeugung

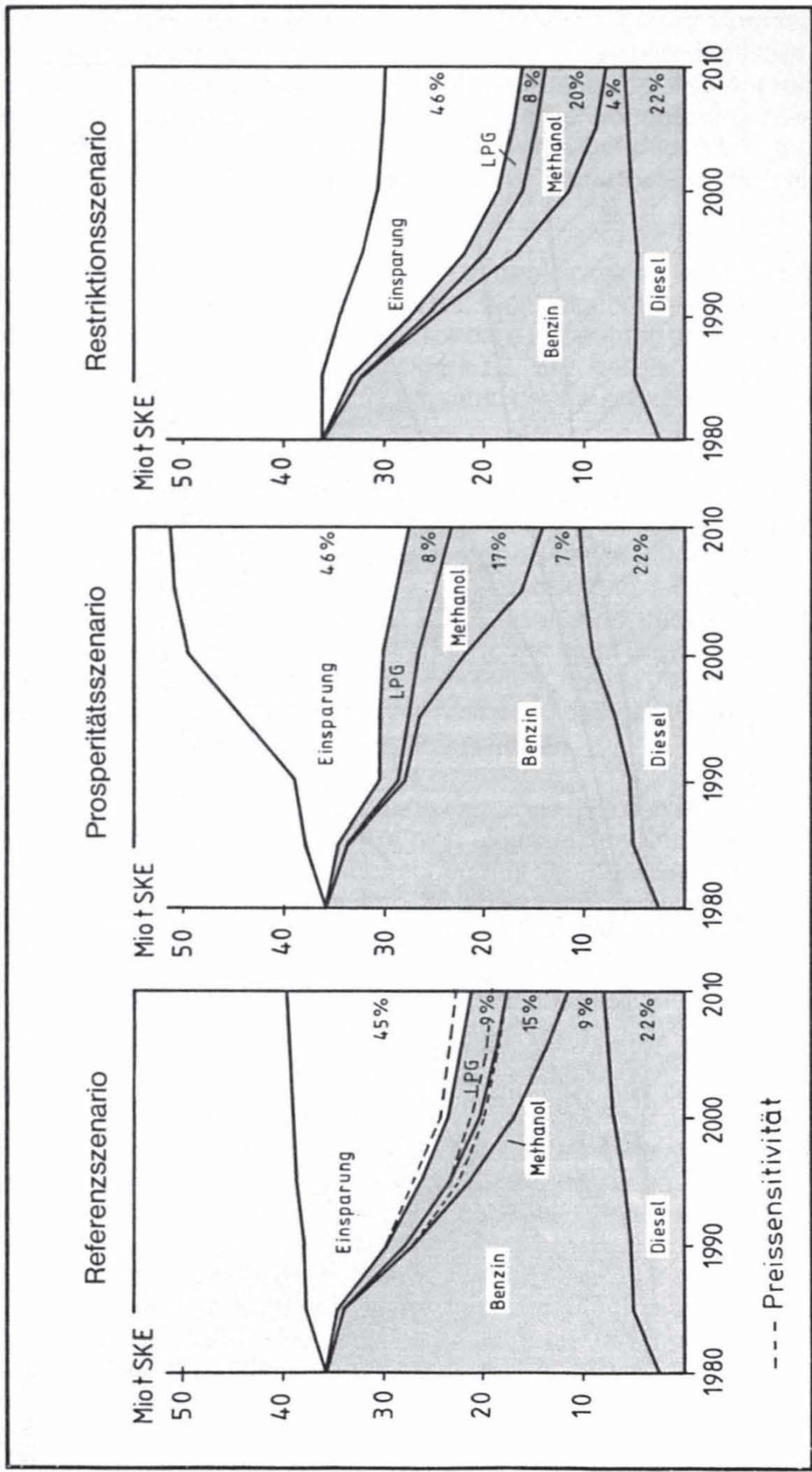


Abb. 19: Endenergieverbrauch der Pkw

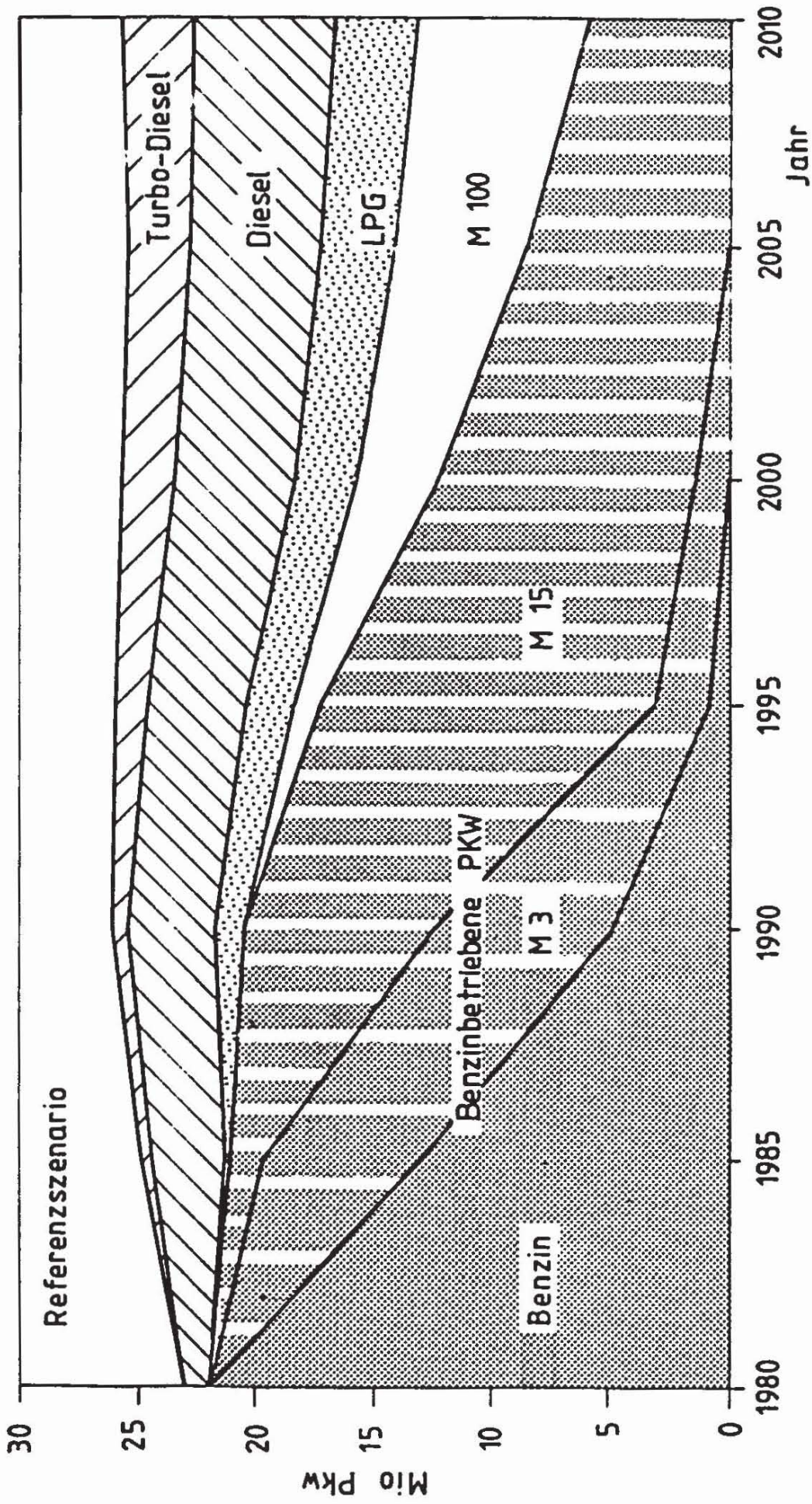


Abb. 20/1: Entwicklung der Pkw-Bestände nach Kraftstoffarten



freigesetzten Mengen an Stein- und Braunkohle die Methanolverfügbarkeit. Aus diesem Grund erreicht auch das Methanol seinen höchsten Versorgungsbeitrag im Prosperitätsszenario, wo der Ausbau der Kernenergie keinen politischen Restriktionen unterworfen ist. Wie bereits erwähnt, erweist sich eine inländische Methanolproduktion aus Kohle bei den relativ moderaten Ölpreissteigerungen der Preissensitivität zum Referenzszenario als nicht wirtschaftlich.

Trotz der unterschiedlichen Ergebnisse in den einzelnen Modellrechnungen könnte Methanol der aussichtsreichste, nicht ölgebundene Alternativkraftstoff werden. Ihm käme damit eine besondere Bedeutung für die Reduzierung der Ölabhängigkeit des Verkehrssektors zu. Eine heimische Methanolkraftstoffproduktion hat aber nur Chancen, wenn die wirtschaftlichen Risiken politisch abgesichert werden.

Andere alternative Kraftstoffe wie Ethanol, CNG (compressed natural gas), Wasserstoff und Strom, die in die Modellrechnungen ebenfalls mit einbezogen wurden, haben nach den Szenarioergebnissen im Betrachtungszeitraum keine Marktchancen. Ob technologische Durchbrüche, z. B. bei der Speicherung von Wasserstoff oder Strom, zu erwarten sind und inwieweit sie die Marktchancen dieser Kraftstoffe verändern, war nicht Gegenstand der Untersuchung. Aber auch in einem derartigen Fall dürfte die Zeit für die Markteinführung und Marktdurchdringung so groß sein, daß der Versorgungsbeitrag im betrachteten Zeithorizont nur gering sein wird.

Die sich aus den Szenariorechnungen ergebenden gravierenden Veränderungen der Struktur der im Pkw-Bereich eingesetzten Kraftstoffe muß natürlich einhergehen mit einer entsprechenden Veränderung der Zusammensetzung des Pkw-Bestandes. In Abb. 20 ist die zeitliche Entwicklung der Pkw-Bestände für die verschiedenen Szenarien dargestellt.

Der langfristig sich einstellende Pkw-Gesamtbestand schwankt in den einzelnen Szenarien zwischen 24 Mio. und 28 Mio. Fahrzeugen. Der Pkw-Markt ist gegenwärtig durch benzingetriebene Fahrzeuge geprägt. Im Jahre 1980 waren ca. 95% des Bestandes Benzin-Pkw und ca. 5% Diesel-Pkw.

Bereits in den letzten Jahren war ein verstärktes Verbraucherinteresse an dieselgetriebenen Fahrzeugen festzustellen, was dazu führte, daß der Dieselanteil bei den Neuzulassungen zeitweise 20% betrug. Die Modellrechnungen zeigen in allen Szenarien eine Fortsetzung dieses Trends. Der Dieselbestand überschreitet in allen Szenarien bereits 1990 die 4 Mio. Marke. Gegen Ende des Jahrhunderts verlangsamt sich die Bestandszunahme konventioneller Dieselfahrzeuge, und der Zuwachs im Gesamtbestand an Diesel-Pkw wird wesentlich vom Turbodiesel getragen, der dem Dieselfahrzeug die Käuferkreise erschließt, die auf höhere Fahrleistungen Wert legen. Gegen Ende des Betrachtungszeitraumes schwankt der Diesel-Pkw-Bestand zwischen 8,5 und 10 Mio. Fahrzeugen.

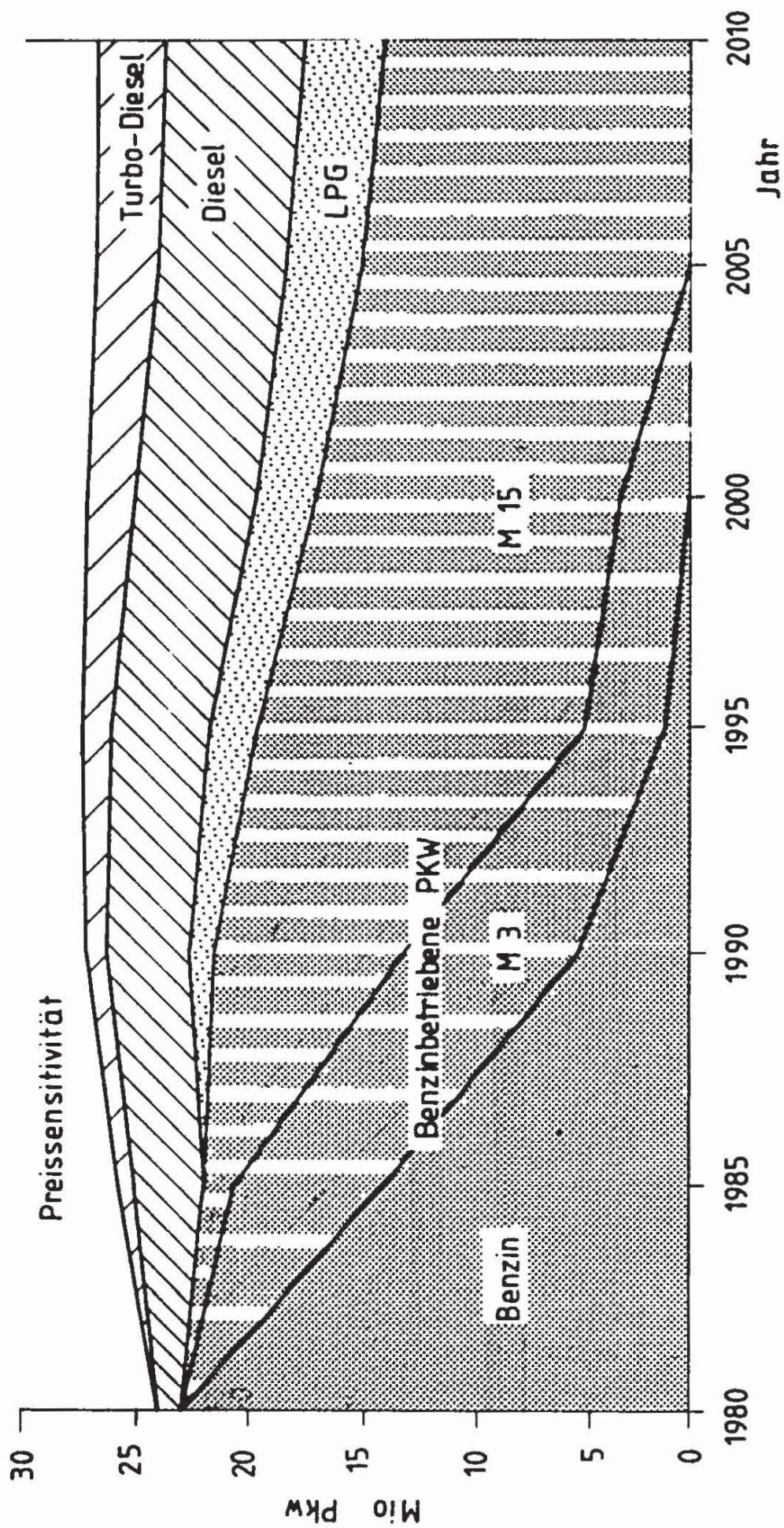


Abb. 20/2: Entwicklung der Pkw-Bestände nach Kraftstoffarten

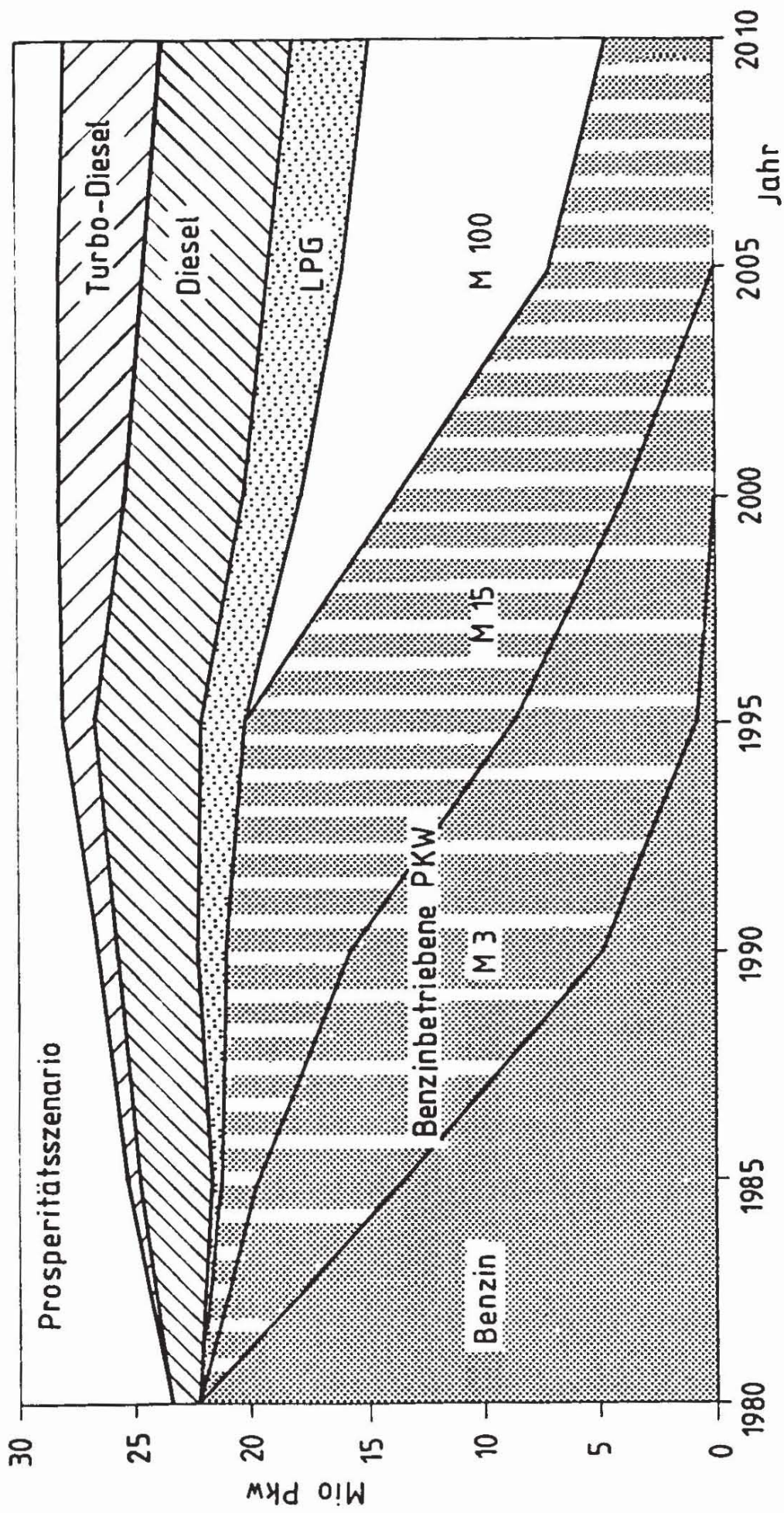


Abb. 20/3: Entwicklung der Pkw-Bestände nach Kraftstoffarten

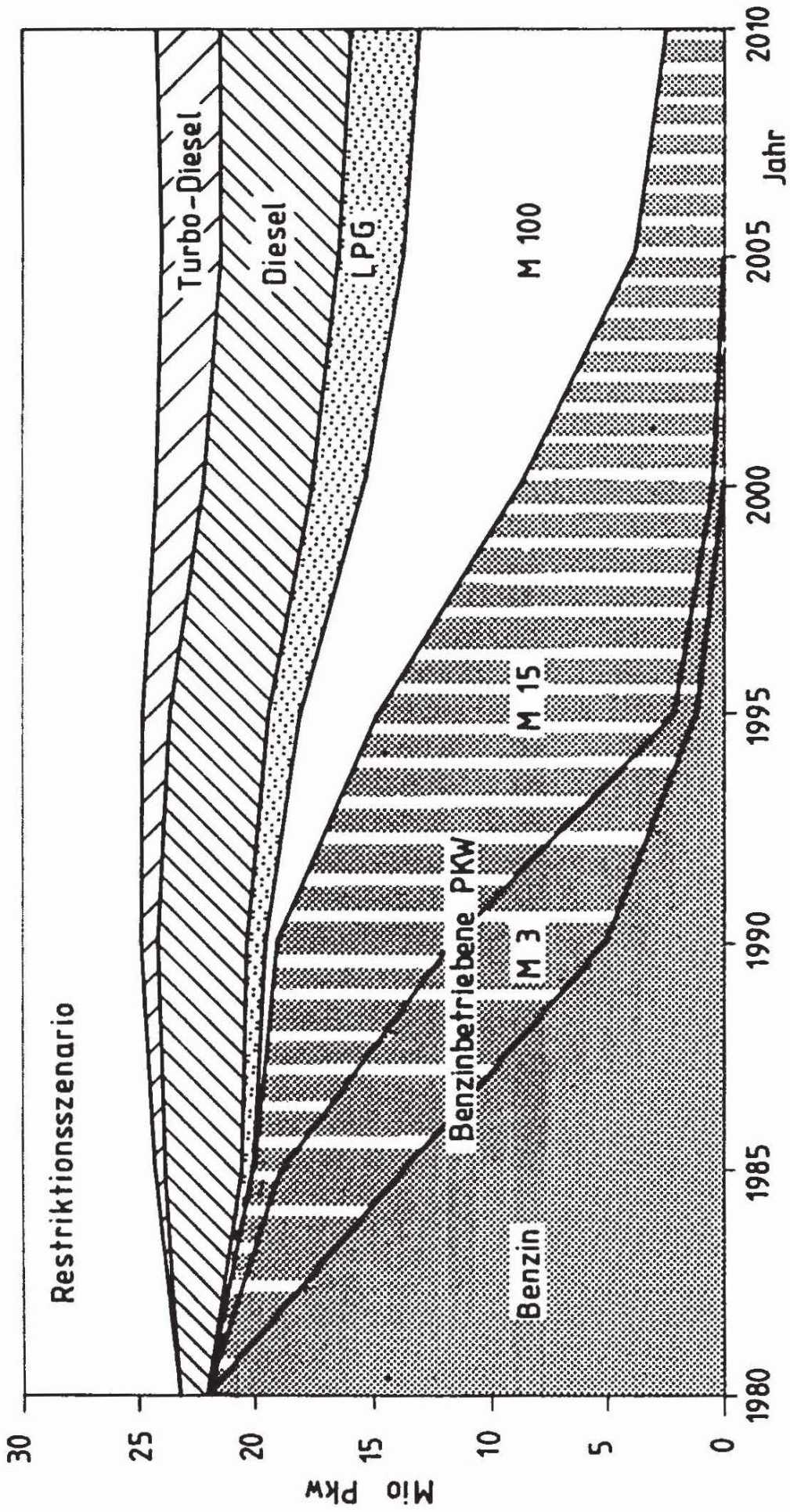


Abb. 20/4: Entwicklung der Pkw-Bestände nach Kraftstoffarten

Auch für die LPG-getriebenen Fahrzeuge errechnen sich steigende Bestandszahlen. Sie beruhen in den ersten Jahren ausschließlich auf dem Einsatz von nachträglich mit Gas-Anlagen ausgerüsteten Benzinfahrzeugen. Eine wesentliche Marktausweitung stellt sich mit der Einführung LPG-optimierter Fahrzeuge gegen Ende des Jahrzehnts ein. Ausschlaggebend für diese Entwicklung sind neben dem LPG-Preis der günstigere energetische Verbrauch und steuerliche Vorteile. Diversifizierung der Energieversorgung und Emissionsreduzierung werden auch weiterhin wichtige energie- und umweltpolitische Faktoren einer entsprechenden steuerlichen Bevorzugung des LPG sein, wie sie auch die 3. Fortschreibung des Energieprogramms der Bundesregierung beinhaltet. Bereits 1985 könnte ein flächendeckendes Netz von ca. 1000 LPG-Stationen vorhanden sein. Damit wäre eine wichtige infrastrukturelle Voraussetzung für einen steigenden LPG-Fahrzeugbestand gegeben, der in den Rechnungen 1990 ca. 1 Mio. Fahrzeuge beträgt und seinen Sättigungswert mit ca. 3 Mio. Fahrzeugen erreicht. Dieser Sättigungswert ist durch die LPG-Verfügbarkeit bedingt.

Der Einsatz von Methanol beginnt in allen Szenarien zunächst durch die Zumischung von drei Volumenprozent Methanol zum Benzin. Dies wird bereits heute praktiziert und erfordert bei Einhaltung der DIN-Spezifikationen keinerlei Umstellungen an den Fahrzeugen.

Mit steigenden Ölpreisen erfolgt dann der Einsatz spezieller, für den Methanolbetrieb ausgelegter Fahrzeuge, und zwar werden zunächst Fahrzeuge mit einem Benzin-Methanol-Mischkraftstoff eingesetzt, für den das M15 (15 Vol-% Methanol) exemplarisch den Untersuchungen zugrunde gelegt wurde. Weiter steigende Ölpreise und eine zunehmende Wirtschaftlichkeit von Methanol auf Kohlebasis begünstigen die Amortisation der Zusatzkosten der Reinmethanolfahrzeuge (M100), deren spezifischer Energieverbrauch außerdem noch günstiger ist. Mit Beginn der 90er Jahre dringen nach den Modellrechnungen die M100 Fahrzeuge verstärkt in den Markt und erreichen im Jahre 2010 Bestandszahlen, die je nach Szenario zwischen 7,5 und 10 Mio. Fahrzeugen liegen. Allein unter den Energiepreisannahmen der Preissensitivität zum Referenzszenario erweist sich die Einführung von Reinmethanolfahrzeugen als nicht wirtschaftlich, da hier die Methanolerzeugung aus heimischer Kohle unwirtschaftlich ist. Die in diesem Szenario begrenzten, ausschließlich aus Importen zur Verfügung stehenden Methanolmengen werden als Mischkraftstoff eingesetzt, unter anderem deshalb, weil für M 15-Fahrzeuge kaum Zusatzkosten zu Buche schlagen.

Zeitlicher Ablauf und Umfang der Methanolnutzung werden entscheidend von der Versorgungsseite geprägt. Auf die Zusammenhänge zwischen der Methanolerzeugung mittels autothermer und allothermer Kohleveredlungsverfahren sowie dem Ausbau der Kernenergie wird im nächsten Kapitel eingegangen.

## **Öffentlicher Personenstraßen- und Straßengüterverkehr**

Der Energieverbrauch des Öffentlichen Personenstraßenverkehrs macht 1980 weniger als 3% des Endenergieverbrauchs des Verkehrssektors in der Bundesrepublik Deutschland aus. Er ist von daher für Primärenergiesubstitutionsvorgänge von geringer Bedeutung. Während in der Vergangenheit das Netz schienengebundener Verkehrsmittel (U-Bahn, Straßenbahn, Hoch- und Stadtbahnen) stetig verringert wurde, war gleichzeitig eine Verlagerung auf den Kraftomnibusverkehr zu beobachten. Letzterer trägt gegenwärtig fast 90% des Öffentlichen Personenstraßenverkehrs.

Nach heutigem Stand der Technik gibt es bei Überlandlinien- und Reisebussen keine Alternativen zum Dieselantrieb. Für den Standardlinienbus bieten sich neben dem Dieselmotorkraftstoff aus technischer Sicht LPG, M100, LNG (liquefied natural gas) und der Elektroantrieb als Alternativen an. Der Kraftomnibusverkehr kann auf sich allein gestellt nicht zum Motor eines Einsatzes alternativer Kraftstoffe werden. Dazu ist der Kraftstoffabsatz in diesem Sektor, verglichen mit anderen Absatzbereichen der Energiewirtschaft, zu gering. Aus diesen Gründen wurden in den Rechnungen Alternativen zum Dieselantrieb nicht explizit betrachtet. Aus den Entwicklungslinien im Pkw-Bereich läßt sich jedoch folgern, daß – wenn überhaupt – auch bei den Bussen LPG und Methanol die aussichtsreichsten Alternativkraftstoffe sind.

In Tabelle 7 und Abb. 22 und Abb. 23 ist die Entwicklung der Endenergienachfrage des öffentlichen Personenstraßenverkehrs angegeben.

Die Endenergienachfrage des Straßengüterverkehrs nimmt in allen Szenarien zu. Dieser Nachfrageanstieg ist vor allem Ausdruck der wachsenden wirtschaftlichen Aktivität, die eine Zunahme des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung bewirkt. Energieeinsparungsraten von ca. 10 bis 15% dämpfen den Anstieg des Energieverbrauchs auch in diesem Sektor, können aber den Mehrverbrauch aufgrund wachsender Verkehrsleistung nicht wie im Personenindividualverkehr kompensieren.

Der Dieselmotorkraftstoff bleibt der dominierende Energieträger für den Betrieb der Lastkraftwagen. Nach vorliegenden Erkenntnissen gibt es gerade in den höheren Gewichtsklassen praktisch keine Alternativen zum Dieselantrieb. Von den möglichen alternativen Nutzfahrzeugantrieben in der Gewichtsklasse bis 3,5 t Gesamtgewicht kommt langfristig nur Methanol (M100) zum Einsatz. Nach ökonomischen Kriterien ist also bei den Lkw wie auch bei den Pkw Methanol die erste Alternative zu ölgebundenen Kraftstoffen. Benzin, das 1980 noch einen bemerkenswerten Marktanteil, vor allem in der unteren Gewichtsklasse, hatte, gerät auch hier in allen Szenarien unter starken Substitutionsdruck. Tab. 8 und Abb. 21 fassen die Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs im Straßengüterverkehr zusammen.

Mio. t SKE

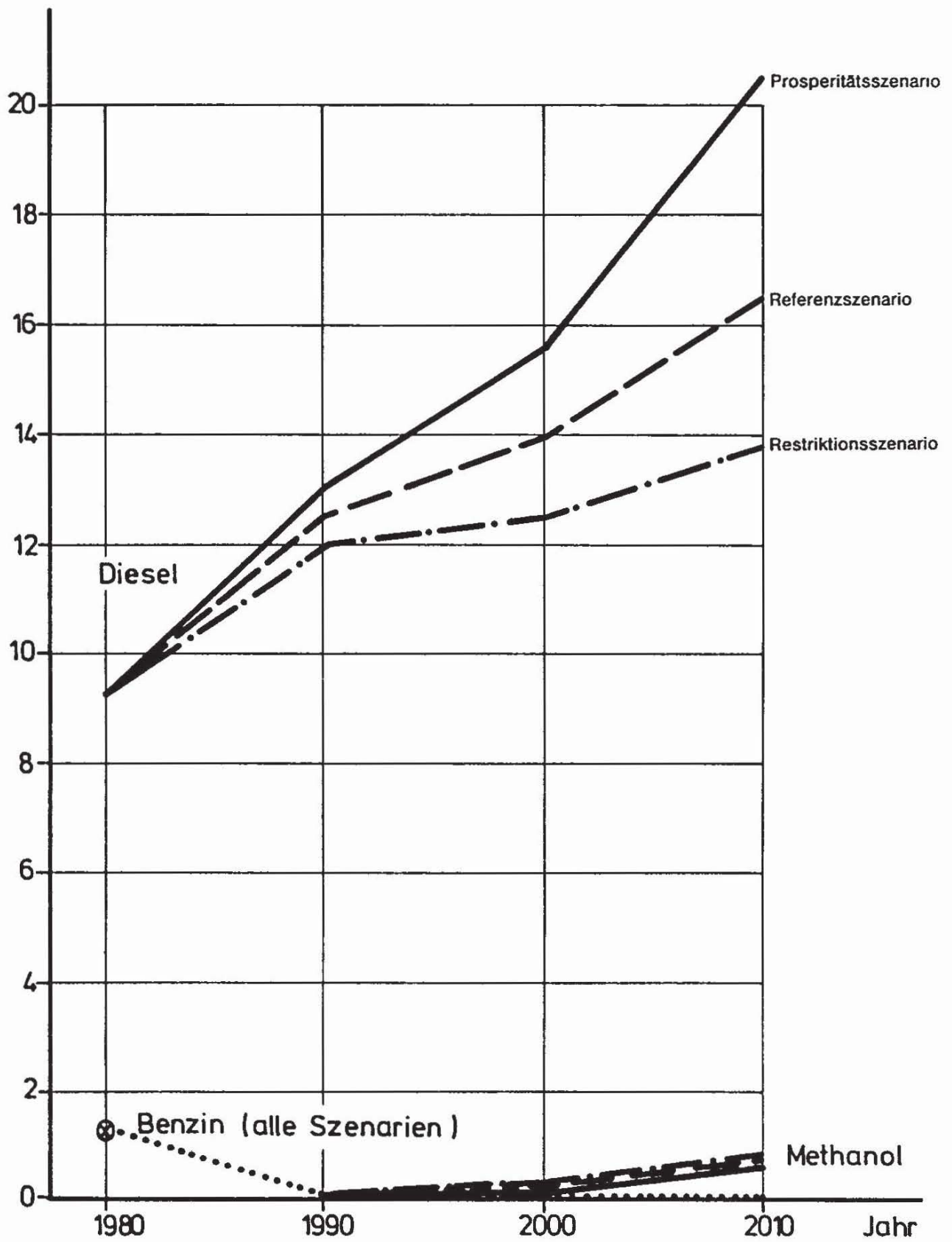
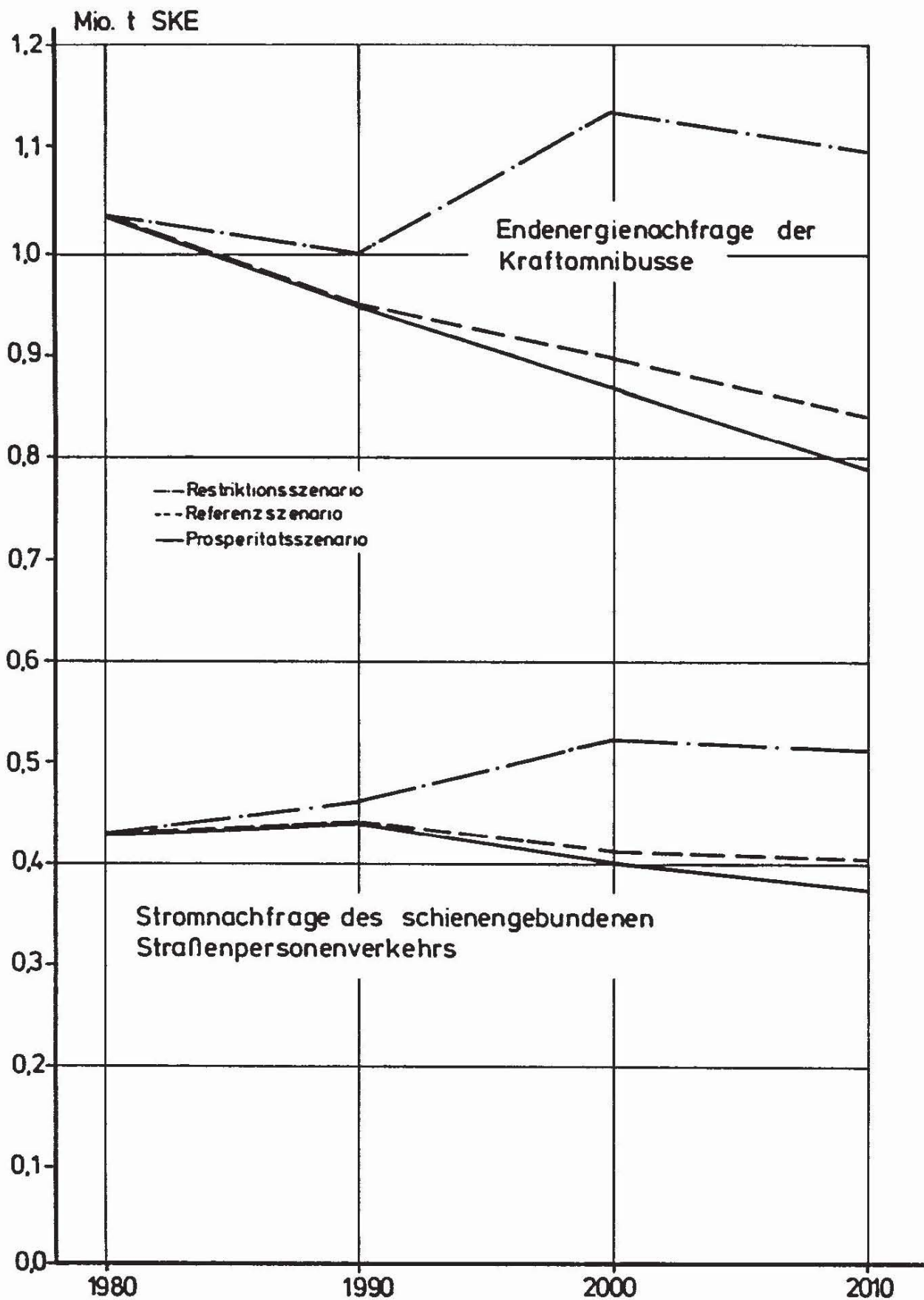


Abb. 21: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs im Straßengüterverkehr



**Abb. 22: Endenergienachfrage des öffentlichen Personenstraßenverkehrs**



**Tab. 7:**  
**Endenergienachfrage des öffentlichen Personenstraßenverkehrs**

		1980	1990	2000	2010
Stromnachfrage des schienengebundenen Personenstraßenverkehrs (Mio. t SKE)	Referenzszenario	0,43	0,44	0,41	0,40
	Prosperitätsszenario		0,44	0,40	0,37
	Restriktionsszenario		0,46	0,52	0,51
Endenergienachfrage der Kraftomnibusse (Mio. t SKE)	Referenzszenario	1,04	0,95	0,90	0,84
	Prosperitätsszenario		0,95	0,87	0,79
	Restriktionsszenario		1,00	1,14	1,10

### Übriger Verkehr

Unter „Übrigem Verkehr“ werden alle anderen Verkehrsträger zusammengefaßt, und zwar der Schienenverkehr der Eisenbahnen, der Luftverkehr, die Küsten- und Binnenschiffahrt und außerdem noch die Seeschiffahrt sowie die Rohrfernleitungen. Die Entwicklung des Energieverbrauchs des übrigen Verkehrs ist in Tabelle 9 dargestellt.

Den größten Anteil am Energieverbrauch dieses Bereichs hatte im Jahre 1980 die Hochseeschiffahrt. Der starke Zuwachs des Luftverkehrs in allen Szenarien läßt langfristig die Luftfahrt zum bedeutendsten Energieverbraucher dieses Sektors werden. Der Energieverbrauch für Schienenverkehr, Küsten- und Binnenschiffahrt weist im Vergleich dazu eine geringe Steigerung auf.

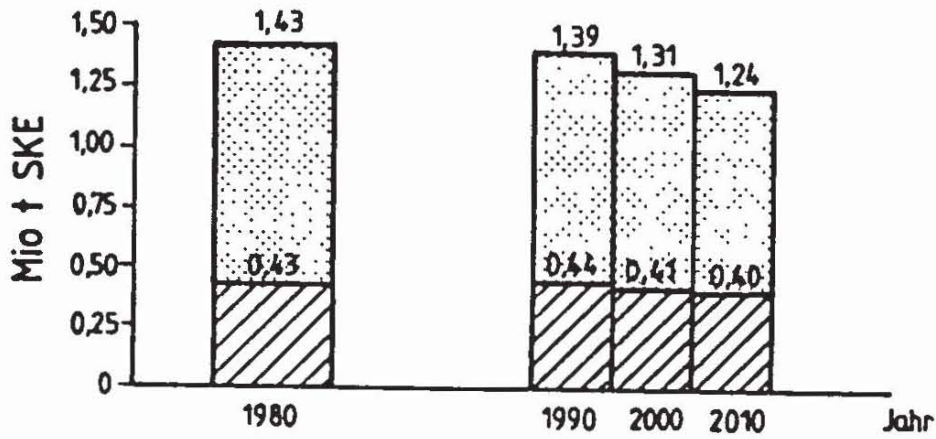
Für die längerfristige Entwicklung im Schienenverkehr der Eisenbahn wurde angenommen, daß sich bei der Dieseltraktion bis zur Jahrhundertwende eine 10%ige Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs erreichen läßt. Im Bereich der Elektrotraktion dürfte im gleichen Zeitraum eine Verbrauchsreduzierung von 15% möglich sein. Dies wird vor allem durch einen verstärkten Einsatz der Halbleitertechnik und der damit gegebenen Möglichkeit der Bremsenergieerückgewinnung erreicht, die bereits an Vorserienmodellen erfolgreich erprobt ist. Die geplanten Streckenstilllegungen und die fortschreitende Elektrifizierung werden zu einem weiteren Anstieg des Anteils der Elektrotraktion führen.

Im Bereich der Luftfahrt wird langfristig eine kontinuierliche Reduktion des Energiebedarfs pro Flugzeugsitzplatz von 25–30% unterstellt.

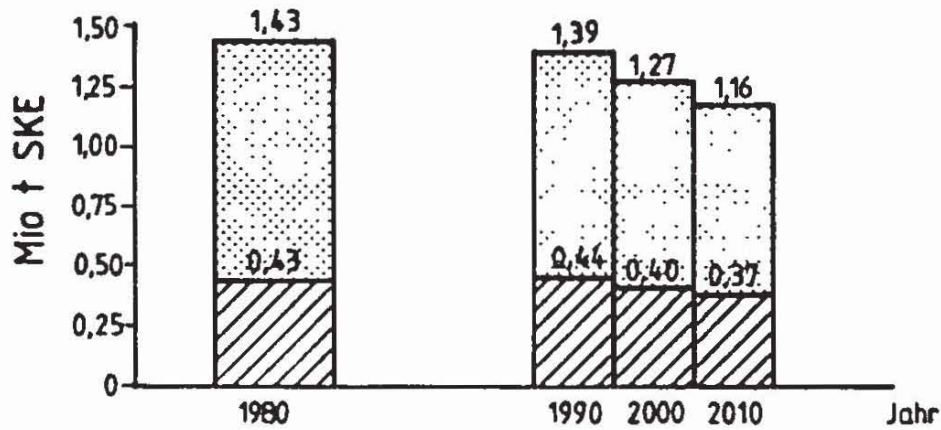
Dies wird nicht nur durch Verbesserungen der Triebwerke, sondern auch durch den Einsatz leichterer Materialien im Flugzeugbau selbst erreicht.

In der Statistik der Arbeitsgemeinschaft der Energiebilanzen wird der Energieverbrauch der Seeschiffahrt nicht dem Sektor Verkehr zugerechnet, sondern getrennt als Hochseebunkerung aufgeführt und in der Primärenergiebilanz als

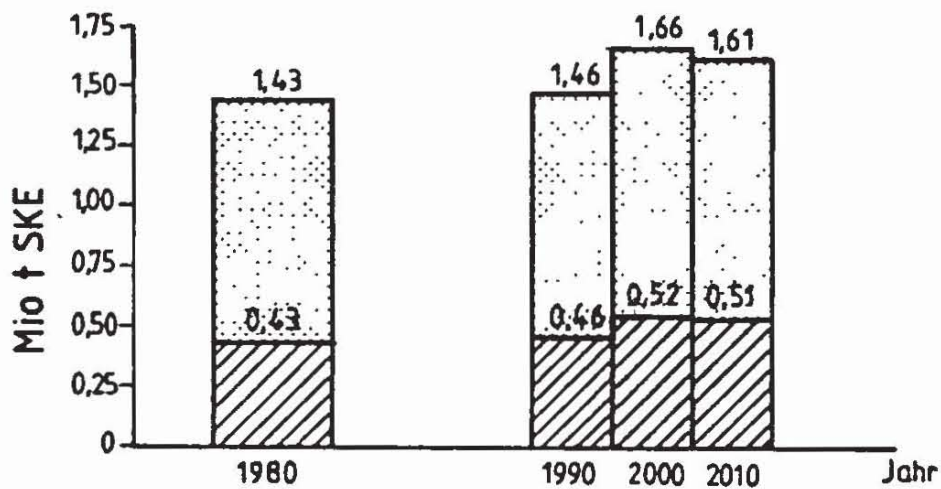
### Referenzszenario



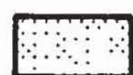
### Prosperitätsszenario



### Restriktionsszenario



Schienengeb.  
Verkehr



Kraftomnibus-  
Verkehr

Abb. 23: Endenergienachfrage des öffentlichen Personenstraßenverkehrs

**Tab. 8:**  
**Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs im Straßengüterverkehr in Mio t SKE**

	Kraftstoffart	1980	1990	2000	2010
Referenzszenario	Benzin	1,3	-	-	-
	Diesel	9,2	12,5	13,9	16,5
	Methanol	-	-	0,3	0,8
Prosperitätsszenario	Benzin	1,3	-	-	-
	Diesel	9,2	13,0	15,5	20,5
	Methanol	-	-	0,1	0,7
Restriktionsszenario	Benzin	1,3	-	-	-
	Diesel	9,2	12,0	12,5	13,8
	Methanol	-	-	0,3	0,8

Export behandelt. Da die Hochseebunkerung als Nachfrage im inländischen Energiemarkt wirksam wird, findet sie Eingang in die Optimierungsrechnungen. Sie wird in dieser Studie abweichend von der Konvention der Energiebilanz als Bestandteil des Primärenergieverbrauchs ausgewiesen.

Im Gegensatz zum Luftverkehr lassen sich auf den Seeschiffen größere Mengen Treibstoff bunkern, so daß auch für größere Strecken Vorräte an Bord genommen werden können und eine Disposition nach dem jeweils günstigen Kraftstoffangebot möglich ist. Die Seeschiffe fahren fast bitumenähnliches

**Tab. 9:**  
**Endenergieverbrauch für Schiene, Luft und Schifffahrt (incl. Hochseebunkerung) im Mio t SKE**

	1980	1990	2000	2010
Referenzszenario	12,3	13,6	14,5	15,5
Prosperitätsszenario	12,3	13,7	15,0	16,7
Restriktionsszenario	12,3	14,0	15,8	16,5

Schweröl, im wesentlichen Rückstände aus der Raffinerie. Dennoch haben die Brennstoffkosten in der Seeschifffahrt ein so hohes Niveau erreicht, daß die Reduzierung des Brennstoffeinsatzes heute wichtigstes Ziel der Schifffahrtentwicklung ist. Vielfältige Maßnahmen zur Brennstoffeinsparung lassen auch bei starker Zunahme des Seeverkehrs keine wesentliche Steigerung der Hochseebunkerung in Häfen der Bundesrepublik Deutschland erwarten.

## **Kapitel 8: Strukturwandel in der Energiewirtschaft**

Die in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Entwicklungstendenzen in den energienachfragenden Sektoren Industrie, Haushalte, Kleinverbrauch und Verkehr sind natürlich nicht losgelöst von den Entwicklungen im Umwandlungssektor zu sehen, sondern sie beeinflussen sich wechselseitig. Dieses abschließende Kapitel beschreibt die Ergebnisse der Szenario-rechnungen für die Bereiche Stromerzeugung, Mineralölverarbeitung und Kohleveredlung.

### **Stromerzeugung**

Die Entwicklung der Stromnachfrage bzw. der Brutto-Stromerzeugung ist stark durch die szenariospezifischen Annahmen geprägt und verläuft recht unterschiedlich. Allen Szenarien gemeinsam ist aber, daß das Wachstum der Stromerzeugung deutlich hinter den Wachstumsraten der Vergangenheit zurückbleibt (siehe Abb. 24). Im Prosperitätsszenario wächst die Stromerzeugung am stärksten, und zwar mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 2,6%/a, so daß sie am Ende des Betrachtungszeitraums mit 815 TWh mehr als doppelt so hoch ist wie heute. Die Zuwachsrate der Stromerzeugung im Referenzszenario liegt bei 1,9%/a und die im Restriktionsszenario unter 1%/a, wobei hier die Stromerzeugung ab Mitte der neunziger Jahre stagniert.

Die Entwicklung der Stromerzeugungsstruktur ist wesentlich geprägt durch die szenariospezifischen Annahmen über die Nutzung der Kernenergie. Im Restriktionsszenario ist der Ausbau der Kernenergie auf das Kapazitätsniveau der heute im Bau und im Betrieb befindlichen Anlagen beschränkt. Diese Limitierung führt im Systemzusammenhang zu einer geringeren Stromnachfrage und zu einer anteilmäßig höheren Stromerzeugung in Stein- und Braunkohlekraftwerken. Dabei werden Steinkohlekraftwerke im Grundlast- und unteren Mittellastbereich betrieben.

Im Referenzszenario ist der Zubau von neuen Kernkraftwerken auf jährlich 2,5 GW begrenzt, während im Prosperitätsszenario die Zubaurestriktionen sich eher an den Kapazitäten der kraftwerkbauenden Industrie orientieren. Der Ausbau der Kernenergie erfolgt in beiden Szenarien dergestalt, daß die Zubaumöglichkeiten ausgeschöpft werden, weil im Systemzusammenhang der Strom aus Kernkraftwerken am kostengünstigsten ist und der verstärkte Ausbau der Kernenergie Stein- und Braunkohle für die Kohleveredlung freisetzt. Im Prosperitätsszenario geht die Stromerzeugung aus Braunkohle auf 30% des heutigen Wertes zurück. In der Preissensitivität zum Referenzszenario, wo eine Veredlung heimischer Kohle sich nicht als wirtschaftlich erweist, bleibt die Stromerzeugung der wesentliche Verwendungsbereich der Braunkohle.

Die Stromerzeugung in Öl- und Gaskraftwerken geht in allen Szenarien zurück und läuft entsprechend der Lebensdauer der vorhandenen Kraftwerke

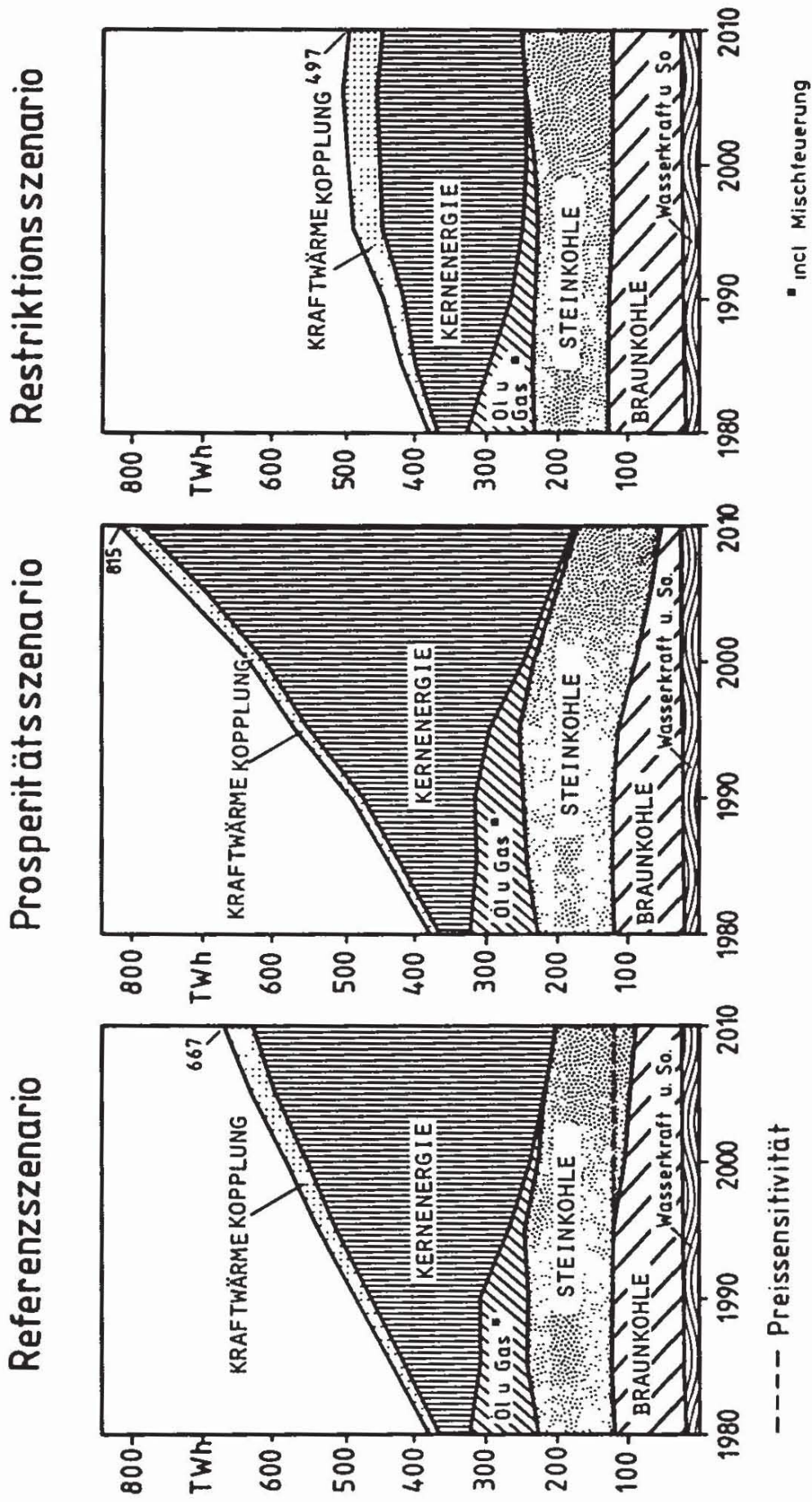


Abb. 24: Entwicklung der Brutto-Stromerzeugung

schließlich ganz aus. Öl und Erdgas sind als Brennstoffe für Kraftwerke im Rahmen der Szenarioannahmen nicht wettbewerbsfähig, sie kommen langfristig nur im geringen Umfang zur Anfahr- und Stützfeuerung in Kohlekraftwerken zum Einsatz.

Die Stromerzeugung aus Kraftwärme-Kopplungsanlagen ist eng mit der Fernwärmeentwicklung verknüpft. Sie verdoppelt sich im Prosperitätsszenario und vervierfacht sich im Restriktionsszenario. In allen Fällen wird die Steinkohle verstärkt in den Heizkraftwerken eingesetzt.

### Mineralölverarbeitung

Die Entwicklungen im Raffineriebereich spiegeln zum einen den Rückgang des Ölverbrauchs und zum anderen die Veränderungen in der Nachfragestruktur der Mineralölprodukte wider. Der Rückgang des Einsatzes von Rohöl in heimischen Raffinerien, der bereits in den letzten Jahren zu beobachten war, setzt sich in allen Szenarien auch in der Zukunft fort. Im Referenz- und Prosperitätsszenario reduziert sich der Rohöleinsatz um fast 50% (siehe Tab. 10); im Restriktionsszenario geht er sogar auf ein Drittel zurück. In der Preissensitivität zum Referenzszenario fällt dagegen der Rückgang mit 30% weniger dramatisch aus.

Von der Mineralölindustrie werden zur Zeit erhebliche Anstrengungen unternommen durch den Zubau von Konversionsanlagen die Palette zu den

**Tab. 10:**  
**Entwicklung des Raffineriedurchsatzes und Konversionsausstoßes (Mio t OE)**

	Anlagentyp	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
Referenzszenario	Rohöldurchsatz	103	99	90	77	64	58	55
	cat. Cracker	8	4	2	5	5	3	-
	Hydrocracker	2	3	3	-	-	-	-
	thermische Cracker	12	11	10	4	-	-	-
Preissensitivität	Rohöldurchsatz	103	99	95	85	77	75	72
	cat. Cracker	8	4	3	-	-	-	-
	Hydrocracker	2	3	3	1	1	1	-
	thermische Cracker	12	11	10	13	11	10	10
Prosperitätsszenario	Rohöldurchsatz	103	99	92	84	68	63	56
	cat. Cracker	8	4	4	6	5	4	-
	Hydrocracker	2	3	3	3	3	3	-
	thermische Cracker	12	12	11	5	-	-	6
Restriktionsszenario	Rohöldurchsatz	103	90	70	57	47	41	37
	cat. Cracker	8	4	4	3	3	-	-
	Hydrocracker	2	3	3	1	1	-	-
	thermische Cracker	12	7	3	1	-	-	-

leichter-siedenden Produkten zu verschieben. Aufgrund der durchgeführten Modellrechnungen scheint ein Ausbau von Konversionsanlagen zur Umwandlung schwerer Mineralölprodukte zu Benzin langfristig keine energie-wirtschaftlich sinnvolle Strategie zu sein. Die Kosten neuer Konversionsanlagen einschließlich der Verzinsung und Abschreibung können, wie die Modellrechnungen zeigen, durch höhere Erlöse bei den leichteren Mineralölprodukten nicht ausgeglichen werden.

Die Entwicklung des Produktausstoßes aus Konversionsanlagen in den verschiedenen Szenarien verläuft, wie Tab. 10 zeigt, im Detail durchaus unterschiedlich. Dennoch ergibt sich in allen Szenarien, einschließlich der Preissensitivität, keine Notwendigkeit einer Erhöhung der Konversionskapazität; im Gegenteil, der rückläufige Rohöleinsatz führt bei dem bereits heute erreichten hohen Niveau an Konversionskapazität dazu, daß ein Teil dieser Kapazitäten in Zukunft nicht mehr genutzt wird.

Allen Szenarien ist gemeinsam, daß die Entwicklung zurück zur Heizölraffinerie verläuft. Das liegt insbesondere an der sich ändernden Energieverbrauchsstruktur im Verkehrssektor, wo die Energieeinsparung und die Substitution zu Lasten des heute noch sehr hohen Benzinanteils gehen. Der Bedarf an leichten Mineralölprodukten geht somit tendenziell zurück, während die wachsende Nachfrage nach Dieselkraftstoff durch die Zurückdrängung von leichtem Heizöl im Bereich der Haushalte, Kleinverbraucher und Industrie gedeckt wird.

### **Kohleveredlung**

In der vorliegenden Untersuchung wurden alle wesentlichen Verfahren zur Veredlung von Kohle berücksichtigt, so daß in den Modellrechnungen die Umwandlung von Kohle zu SNG (substitute natural gas) und Synthesegas sowie seine Weiterverarbeitung zu Methanol oder Benzin genauso möglich war wie die direkte Verflüssigung der Kohle. Unterschieden wurde außerdem noch zwischen Verfahren, die Braun- oder Steinkohle einsetzen. Zusätzlich zu den autothermen Kohleveredlungsverfahren waren im Prosperitätsszenario auch allotherme Verfahren, die die notwendige Prozeßenergie mittels eines heliumgekühlten Hochtemperaturreaktors erzeugen, zugelassen.

Ob und in welchem Umfang sich die Veredlung von Stein- und Braunkohle aus volkswirtschaftlicher Sicht als sinnvoll erweist, hängt entscheidend von den Preisrelationen zwischen Kohle auf der einen und Erdöl und Erdgas auf der anderen Seite sowie von der Verfügbarkeit der Kernenergie ab.

Wie aus der Tabelle 11 zu entnehmen ist, findet in den Szenarien, in denen sich die Preisschere zwischen dem Öl- und Kohlepreis öffnet, eine Veredlung von Braun- und Steinkohle statt. Bei der Preissensitivität hingegen, bei der langfristig eine 70%ige Ölpreisparität der Steinkohle bei einem insgesamt niedrigerem Energiepreisniveau unterstellt wird, ist die Veredlung von Kohle,

auch von Braunkohle, nicht kostenoptimal. Bei einer Begrenzung des Kernenergiezuwachses in diesem Szenario ist die Stromerzeugung aus Braunkohle volkswirtschaftlich sinnvoller. Vergleicht man die Ergebnisse bezüglich des Ausbaus der Kohleveredlung zwischen dem Referenz- und Restriktions-szenario, so zeigt sich auch hier der Einfluß der Öl-Kohle-Preisdifferenz. Während im Referenzszenario wegen des zunächst langsameren Anstiegs des Ölpreises die Veredlung nur zögernd zum Zuge kommt, ist im Restriktions-szenario wegen des erheblich schnelleren Preisanstiegs ein größeres Wachstum der Kohleveredlung am Anfang zu beobachten, während der Ausstoß aus den Kohleveredlungsanlagen gegen Ende des Betrachtungszeitraumes stagniert und sogar leicht zurückgeht. Das im Vergleich der Szenarien geringe Niveau der Kohleveredlung ist auf die stark begrenzte Kernkraftwerkskapazität zurückzuführen, die eine Freisetzung von Kohle für die Veredlung nicht ermöglicht, selbst bei der vergleichsweise niedrigen Stromnachfrage in diesem Szenario.

Im Prosperitätsszenario steigt die Erzeugung von synthetischen Kohlenwasserstoffen nach 1995 stark an. Im Jahre 2010 werden hier 52 Mio. t SKE an

**Tab. 11:**  
**Entwicklung der Produktion von Sekundärenergieträgern aus Steinkohle (SK) – und Braunkohleveredlungsverfahren (BK) in Mio t SKE**

Kohleveredlungsrouten	Szenario	1990	1995	2000	2005	2010
Vergasung (SK)	Referenz-szenario	0,2	1,1	0,6	0,6	0,6
Methanol (SK)				3,2	6	8
Verflüssigung (SK)				1,8	1,8	1,8
Vergasung (BK)		0,15	0,6	3	4	6
Methanol (BK)				0,6	0,6	0,5
Verflüssigung (BK)						
Vergasung, autoth. (SK)	Prosperitäts-szenario			2,4	9,6	24
Vergasung, nuklear (SK)				3,5	3,5	–
Methanol, autoth. (SK)					1,9	6
Methanol, nuklear (SK)						
Verflüssig., autoth. (SK)						
Vergasung, autoth. (BK)			2,5	10	10	16
Vergasung, nuklear (BK)						
Methanol, autoth. (BK)				2,3	9,2	9,2
Methanol, nuklear (BK)						
Verflüssig., autoth. (BK)						
Vergasung (SK)	Restriktions-szenario	0,2	1,5	3,3	5	5
Methanol (SK)				0,7	0,8	0,8
Verflüssigung (SK)				0,8	0,8	0,8
Vergasung (BK)		0,03	0,9	0,8	0,8	0,8
Methanol (BK)				1,2	1,2	1,1
Verflüssigung (BK)						



SNG und Methanol aus Kohle erzeugt. Ein großer Teil der hierfür notwendigen Braunkohle (98 Mio. t) und Steinkohle (25 Mio. t) wird durch die forcierte Stromerzeugung aus Kernenergie freigesetzt. Der in diesem Szenario zeitlich spätere Beginn der Kohleveredlung erklärt sich daraus, daß die kostengünstigeren nuklearen Kohleveredlungsverfahren kommerziell erst im Jahr 1995 bzw. 2000 zur Verfügung stehen und daß sich ein möglicher zeitlich früherer Zubau von weniger wirtschaftlichen autothermen Kohleveredlungsverfahren nicht auszahlt.

Die in Tabelle 11 zusammengestellten Ergebnisse zeigen weiterhin, daß die bevorzugten Veredlungsrouten der Kohle die Methanolerzeugung sowie die Kohlevergasung sind. Die direkte Kohleverflüssigung ist vor allem durch die Einsatzvorteile des Methanols im Fahrzeug benachteiligt. Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß die Werte der Tab. 11 den gesamten Ausstoß von Sekundärenergieträgern aus den verschiedenen Kohleveredlungsrouten darstellen. Sie enthalten somit auch die neben dem Hauptenergieträger z. B. Methanol als Koppelprodukte anfallenden anderen Energieträger.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß für die Veredlung von Kohle nur dann Marktchancen bestehen, wenn der Ölpreis erheblich ansteigt, was ja nicht ausgeschlossen werden kann.

# Anhang A

## Mitglieder des FAT-Arbeitskreises 16 „Energie“

Dr. R. Alweswerth  
Magirus-Deutz AG  
Abt. ET  
Postfach 27 40  
7900 Ulm

Dr. P. Lünsdorf  
Daimler-Benz AG  
Forschungsgruppe Berlin  
Daimlerstr. 123  
1000 Berlin 48

R. Baas  
VDO Adolf Schindling AG  
Postfach 61 40  
6231 Schwalbach/Ts.

Dr. D. Lutz  
Sachs Systemtechnik  
Postfach 14 23  
8720 Schweinfurt

Dr. W. Bernhardt\*)  
Volkswagenwerk AG  
Forschung Energietechnik u.  
neue Technologien  
Postfach  
3180 Wolfsburg 1

Dr. D. Schade  
Daimler-Benz AG  
Forschungsgruppe Berlin  
Daimlerstr. 123  
1000 Berlin 48

Dipl.-Ing. D. Frank  
BMW AG  
Abt. EG-3  
Hufellandstr. 8a  
8000 München 40

Dipl.-Ing. D. Schneider  
Ford-Werke AG  
MC/PG  
Postfach 10 06 28  
5000 Köln 1

Dipl.-Ing. L. Hamm  
Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG  
Abt. EFF  
Postfach 11 40  
7251 Weissach

Dr. J. Keller\*\*)   
Daimler-Benz AG  
Abt. E6Z  
Daimlerstr. 123  
1000 Berlin 48

Dipl.-Ing. E. Hipp  
MAN AG  
Vorentwicklung  
Postfach 50 06 20  
8000 München 50

K. Thaler  
Adam Opel AG  
PEK  
Postfach 15 60  
6090 Rüsselsheim

Dipl.-Ing. P. v. Korff  
MAN AG  
Vorentwicklung  
Postfach 50 06 20  
8000 München 50

\*) Obmann des AK  
\*\*) zeitweilige Teilnahme

## Anhang B

### Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten

	J (= Ws)	KWh	TWa	kcal	t SKE	t OE
1 J (= WS)	1	$278 \cdot 10^{-9}$	$31,7 \cdot 10^{-21}$	$239 \cdot 10^{-6}$	$34,1 \cdot 10^{-12}$	$23,7 \cdot 10^{-12}$
1 KWh =	$3,6 \cdot 10^6$	1	$114 \cdot 10^{-15}$	860	$123 \cdot 10^{-6}$	$85,3 \cdot 10^{-12}$
1 TWa =	$31,5 \cdot 10^{18}$	$8,76 \cdot 10^{12}$	1	$7,53 \cdot 10^{15}$	$1,08 \cdot 10^9$	$747 \cdot 10^6$
1 kcal =	$4,19 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$133 \cdot 10^{-18}$	1	$143 \cdot 10^{-9}$	$99,2 \cdot 10^{-9}$
1 t SKE =	$29,3 \cdot 10^9$	$8,14 \cdot 10^3$	$929 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^6$	1	$694 \cdot 10^{-3}$
1 t OE =	$42,2 \cdot 10^9$	$11,7 \cdot 10^3$	$1,34 \cdot 10^{-9}$	$10,1 \cdot 10^6$	1,44	1

$10^3$  : Kilo;  $10^9$  : Giga;  $10^{15}$  : Peta  
 $10^6$  : Mega;  $10^{12}$  : Tera;  $10^{18}$  : Exa

# **Anhang C**

## **Ausgewählte Literatur**

**Voß, A: Möglichkeiten und Grenzen von Energieprognosen. In Existenzfrage: Energie, Econ-Verlag, Düsseldorf 1980.**

**Voß, A.; Schmitz, K. (Hrsg.): Energiemodelle für die Bundesrepublik Deutschland, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1980.**

**Schmitz, K. et al: Analyse und Bewertung von Energieprojektionen für die Bundesrepublik Deutschland. Bericht der Kernforschungsanlage Jülich, Jül-Spez-133, November 1981.**

**Energy in a finite world: Paths to a sustainable future. Report by the Energy Systems Program Group of IIASA. Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1981.**

**World Oil. Summary Report of the Energy Modeling Forum, EMF 6, Stanford University, Stanford, California, 1981.**

**Kuznets, S.: Schumpeters Business Cycles, in: American Economic Review, Volume XXX 1940, S. 250–271.**

**Hildebrandt, T.: Die nächsten 50 Jahre. Analyse und Szenarium der wirtschaftlichen Evolution. Angewandte Systemanalyse Nr. 20, Jül-Spez-81, Jülich 1980.**

**Weiss, J.-P.: Projektionen zu Input-Output-Tabellen für die Bundesrepublik Deutschland für die Jahre 1980 und 1985. Göttingen 1976.**

**Deutscher Bundestag, 8. Wahlperiode: Bericht über die Bevölkerungsentwicklung der Bundesrepublik. Drucksache 8/4437, Bonn 1980.**

**Bellmann, K.; v. Kortzfleisch, G.; Voß, A. u. a.: Energie für den Verkehr – eine systemanalytische Untersuchung der langfristigen Perspektiven des Verkehrssektors in der Bundesrepublik Deutschland und dessen Versorgung mit Kraftstoffen im energiewirtschaftlichen Wettbewerb – FAT-Schriftenreihe Nr. 25, Frankfurt 1983.**

**Entwicklung der deutschen und ausländischen Wohnbevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, DIW-Wochenbericht 50/78, 45. Jg., 1978, S. 475–480.**

Voigt, U.: Die voraussichtliche Entwicklung des Personenverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e. V., Reihe B: B 52 – Energie und Verkehr, Köln 1979.

Hopf, R.; Rieke, H.; Vogt, U.: Analyse und Projektion der Personenverkehrsnachfrage in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000. Gutachten des DIW im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Berlin 1980.

Rieke, H.: Die zukünftige Entwicklung des Straßenverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland. Fahrleistungen, Kraftstoffverbrauch und Mineralölsteueraufkommen, in: DIW-Beiträge zur Strukturforschung, Heft 22, Berlin 1972.

Frank, H.-J.; Hopf, R.; John, G. u. a.: Integrierte Langfristprognose für die Verkehrsnachfrage im Güter- und Personenverkehr in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 1980. Gutachten des DIW im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, in: DIW-Beiträge zur Strukturforschung, Heft 43, Bd. I-IV, Berlin 1976/77.

Hopf, R.: Entwicklungstendenzen der Verkehrsnachfrage in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2000 (DIW 2000/Okttober 1977), Berlin 1978.

Aufschwung nach der Talfahrt. Shell-Prognose des Pkw-Bestandes bis zum Jahre 2000. Aktuelle Wirtschaftsanalysen 13, Deutsche Shell AG, Hamburg 1981.

Der Energieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland und seine Deckung bis zum Jahre 1995. Verlag Glückauf GmbH, Essen 1981.

Zukünftige Kernenergie-Politik. Bericht der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages. Zur Sache 1/80, Bonn 1980.

Fossile Energieträger und Kernenergie. Deutsches Atomforum e. V., Bonn 1982.

Förster, H. J.: Das Kraftfahrzeug in der Zukunft. OEL-Zeitschrift für die Energiewirtschaft, 20. Jahrg., Heft 7, 1982.

Börsch, F. K.: Bestimmungsfaktoren verbesserter Energiewirtschaftlichkeit beim Automobil. Zeitschrift für Energiewirtschaft, Heft 3, 1981.

Seiffert, U.: Bedeutung von alternativen Energien für das Kraftfahrzeug. In: Fossile Energieträger und Kernenergie. Deutsches Atomforum e. V., Bonn 1982.

**Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und Straßenverkehr. Forschungsbilanz 1981. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1982.**

**Seidel, G. H.: Bleibt der Diesel auf dem Vormarsch? OEL-Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft, 20. Jahrg., Heft 5, 1982.**

**Hamann, W.: Autogas, eine Ergänzung zum konventionellen Kraftstoffangebot. Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie vereinigt mit Brennstoff-Chemie, Bd. 35, Heft 7, Juli 1982.**

**Bostel, J. u. a.: Möglicher zukünftiger Beitrag regenerativer Energiequellen zur Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland. Aktuelle Beiträge zur Energiediskussion Nr. 6, JÜI-Spez-156, Jülich, 1982.**

# **Anhang D**

## **Beschreibung der verwendeten Modelle**

### **INHALT**

- D 1. Überblick
- D 2. MOVE – Modell der volks- und verkehrswirtschaftlichen Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland
- D 3. JES – Das Jülicher Energiemodellsystem
  - D 3.1 Vorbemerkung
  - D 3.2 Das Energiebedarfsmodell
    - D 3.2.1 Aufgabe und Struktur des Modells
    - D 3.2.2 Der Industriesektor
    - D 3.2.3 Der Sektor Nichtenergetischer Verbrauch
    - D 3.2.4 Der Sektor Haushalte und Kleinverbrauch
    - D 3.2.5 Der Verkehrssektor
  - D 3.3 Das MARKAL-Modell
    - D 3.3.1 Aufgabe und Struktur des Modells
    - D 3.3.2 Endbenutzertechnologien
    - D 3.3.3 Elektrizitäts- und Fernwärmeerzeugung
    - D 3.3.4 Raffineriesektor
    - D 3.3.5 Kohleveredlung
    - D 3.3.6 Primärenergiegewinnung und Importe
    - D 3.3.7 Beispiel einer Technologieabbildung
  - D 3.4 Die Kopplung des Energiebedarfs- und des MARKAL-Modells

### **D 1. Überblick**

Systemanalytische Arbeiten, mit Hilfe von EDV-gestützten Energiemodellen, bieten eine wesentliche Hilfestellung bei energiewirtschaftlichen Planungsproblemen. Diese wird durch die Konsistenz, die Transparenz und durch die Schnelligkeit der Rechnungen sowie die Flexibilität von Methoden und Instrumentarien ermöglicht.

Die für das FAT-Forschungsvorhaben verwendeten Computermodelle MOVE (ISM) und JES (STE) sind in Abb. D 1 übersichtsartig dargestellt.

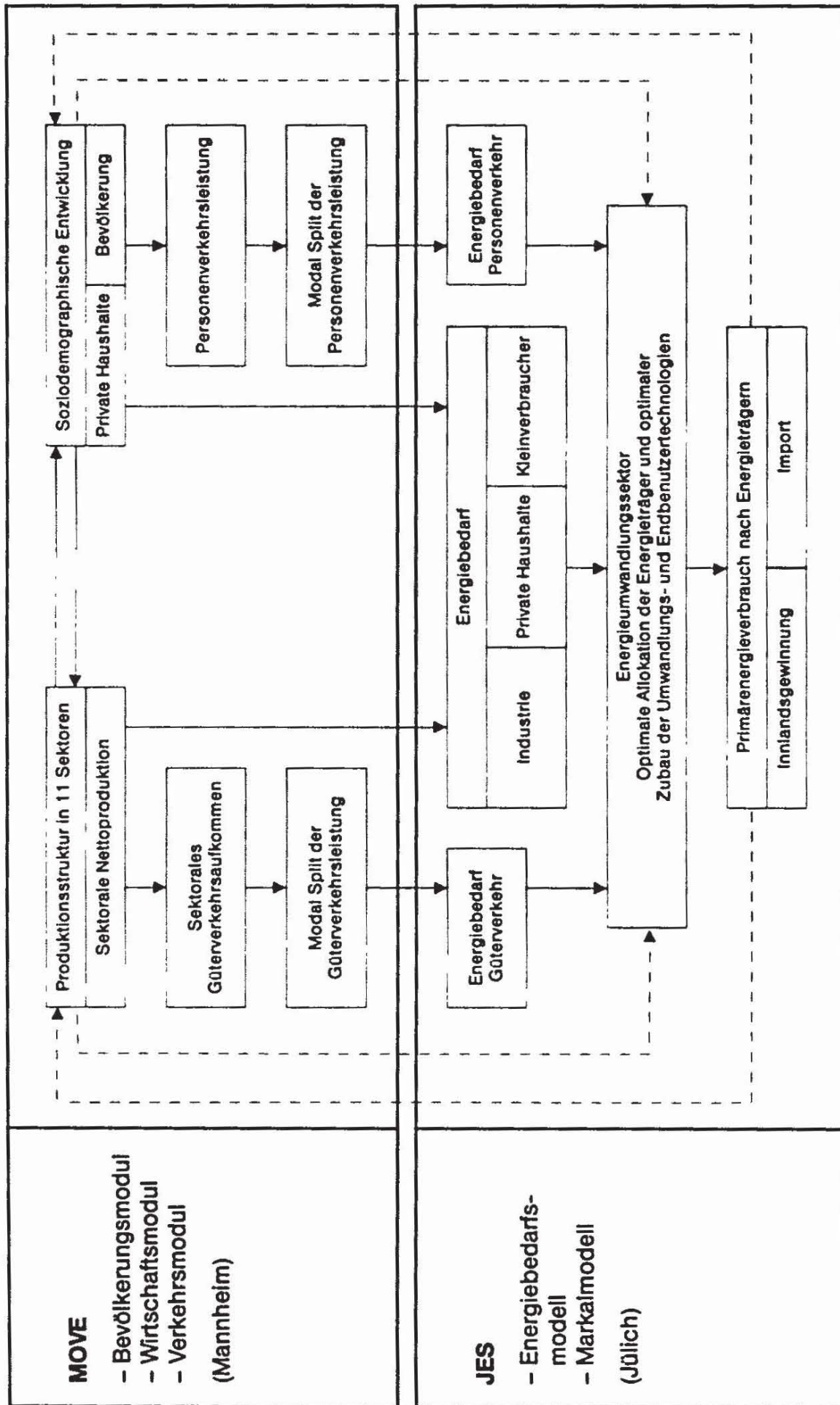


Abb. D 1: Überblick über die verwendeten Modelle



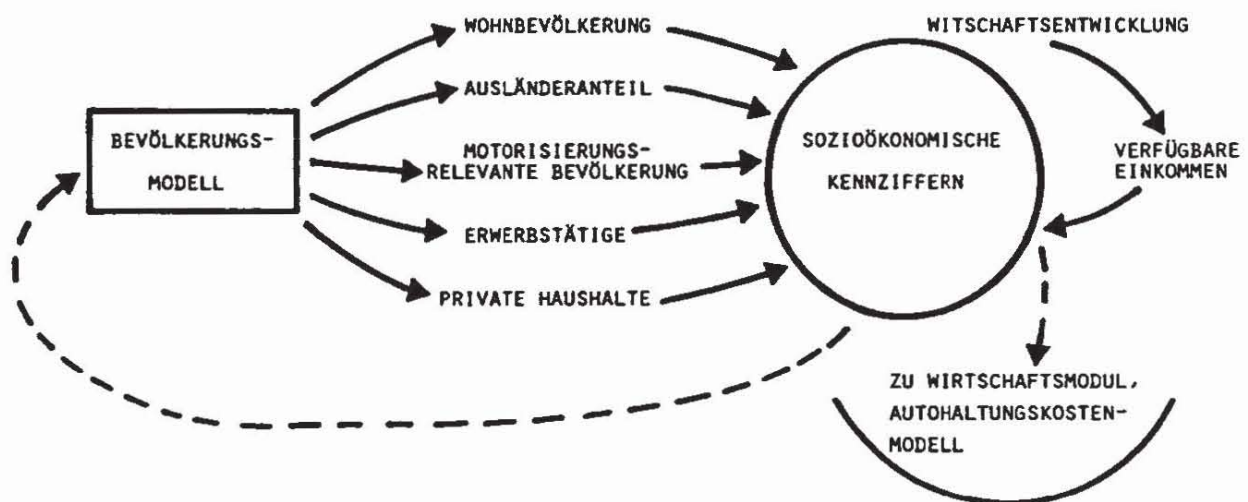
## D 2. MOVE – Modell der volks- und verkehrswirtschaftlichen Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland

Mit dem Simulationsmodell MOVE<sup>1)</sup> wird im Rahmen des Forschungsprojektes „Energie für den Verkehr“ die volkswirtschaftliche, insbesondere die verkehrswirtschaftliche Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland in drei Szenarien über den Zeitraum von 1970 bis 2010 projiziert.

Die Outputdaten des Modells MOVE werden im Jülicher Energiemodellsystem JES weiterverarbeitet und dienen als Inputdaten für ein Autohaltungskostenmodell und für ein Pkw-Absterbemodell, aus dem die Pkw-Neuzulassungen errechnet werden. Auf diese beiden peripheren Modelle wird hier nicht näher eingegangen.

Das Modell MOVE ist modular aus den Sektoren Bevölkerung, Wirtschaft und Verkehr aufgebaut. Die jeweilige Entwicklung wird im Rahmen der Szenarien über Parameter zur Auswahl der erforderlichen Inputdaten gesteuert.

Der Bevölkerungsmodul des PSP-Modells erhält seine Inputdaten, z. B. Wohnbevölkerung, Ausländeranteil, motorisierungsrelevante Bevölkerung, Erwerbstätige, private Haushalte u. a. m., aus einem anderen, externen Bevölkerungsmodell. Diese Daten und weitere aus dem Wirtschaftsmodul werden zu sozioökonomischen Kennziffern verarbeitet, die in das Autohaltungskostenmodell eingehen.

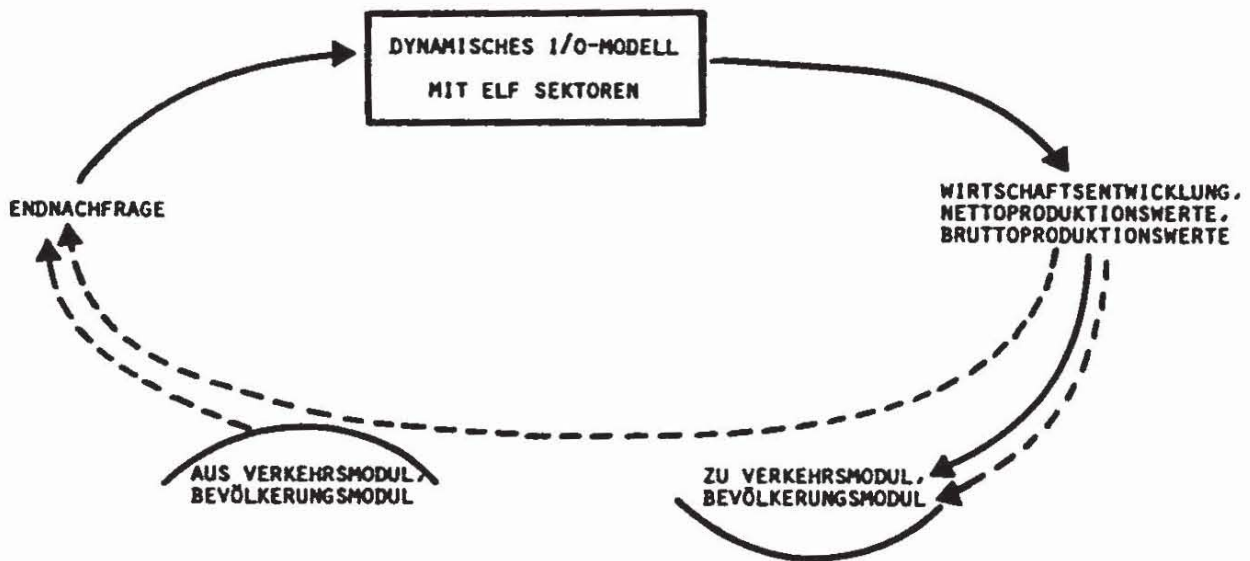


**Abb. D 2: Bevölkerungsmodul**

Im Wirtschaftsmodul wird die volkswirtschaftliche Entwicklung der Bundesrepublik in einem dynamischen Input/Outputmodell mit 11 Sektoren dargestellt und über die Endnachfrage, die aus der Bevölkerungs- und Verkehrsentwicklung resultiert, gesteuert. Die Produktionswerte und deren

<sup>1)</sup> MOVE ist als selbsterklärendes Programm in FORTRAN IV verfügbar.

Veränderungen werden als Outputdaten einerseits in Jülich direkt weiterverarbeitet, andererseits wird daraus im Verkehrsmodul die Nachfrage nach Verkehrsleistungen ermittelt.



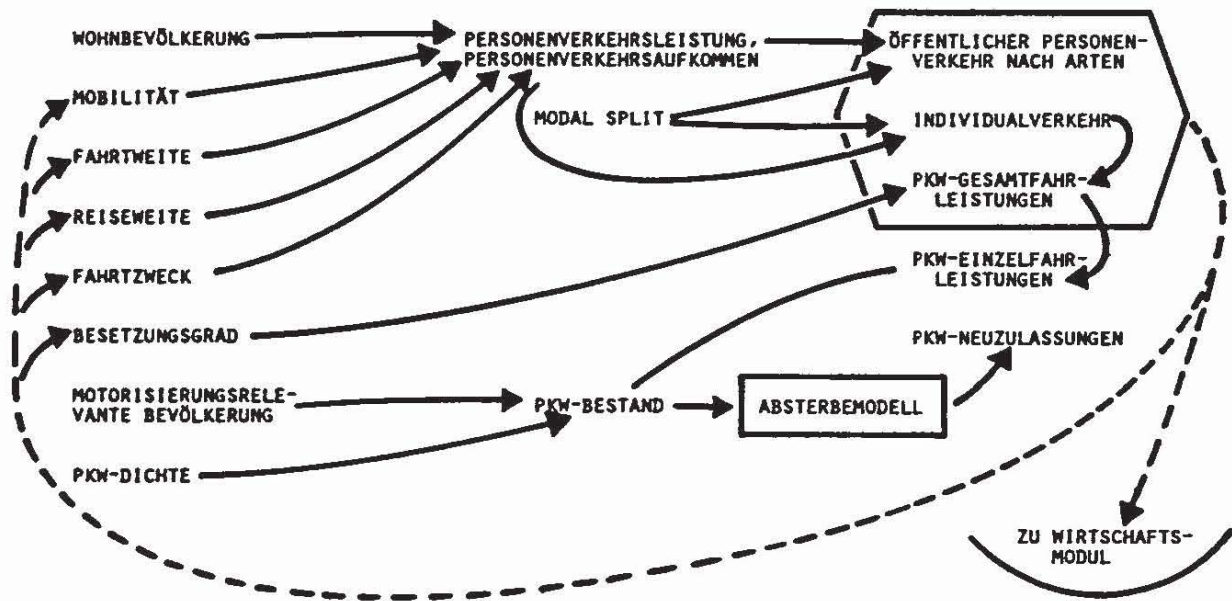
**Abb. D 3: Wirtschaftsmodul**

Der Verkehrsmodul besteht aus den Submodulen Personenverkehr und Güterverkehr. Im Personenverkehrsmodul wird mit den Kennzahlen Mobilität und Fahrtweite die von der Wohnbevölkerung nachgefragte Personenverkehrsleistung generiert. Über die Reiseweite wird daraus das Personenverkehrsaufkommen zunächst berechnet und dann auf seine Plausibilität geprüft.

Im artspezifischen Ansatz werden über Modal-Split-Anteile aus der gesamten Personenverkehrsleistung die Verkehrsleistungen des öffentlichen Personenverkehrs (mit den Verkehrsträgern Straße nah/fern, Schiene nah/fern, Luft) und die Verkehrsleistungen des Individualverkehrs ermittelt. Die Ergebnisse werden mit denen eines verkehrszweckspezifischen Ansatzes überprüft.

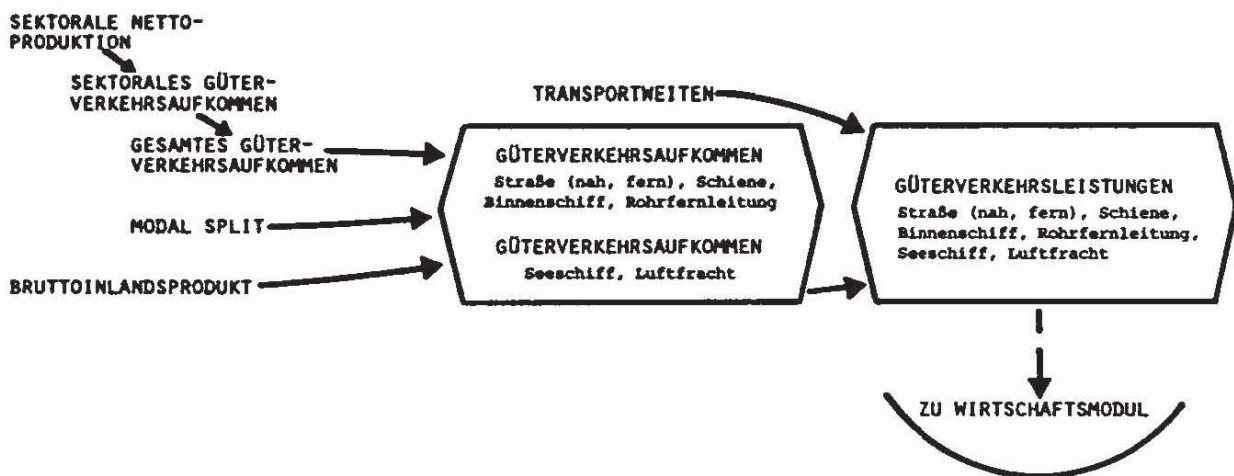
Aus der Individualverkehrsleistung lassen sich über den Besetzungsgrad die Pkw-Gesamtfahrleistung und daraus über den Pkw-Bestand die Pkw-Einzel-fahrleistungen ermitteln. Der Pkw-Bestand wird aus der motorisierungsrelevanten Bevölkerung mit einer aus Korrelationen gewonnenen Dichtefunktion ermittelt. Letztlich werden aus den Änderungen des Pkw-Bestandes die Pkw-Neuzulassungen mit einem Pkw-Absterbemodell abgeschätzt.

Das gesamte Güterverkehrsaufkommen wird im Güterverkehrsmodul aus der Summe der sektoralen Güterverkehrsaufkommen errechnet, die wiederum mit Korrelationen aus den sektoralen Nettoproduktionen gewonnen werden. Nur die Güterverkehrsaufkommen der Seeschifffahrt und der Luftfracht werden mit Korrelationen direkt aus dem Bruttoinlandsprodukt errechnet.



**Abb. D 4: Verkehrsmodul: Personenverkehr**

Über Modal-Split-Anteile und artspezifische Transportweiten werden letztlich die Güterverkehrsleistungen der Verkehrsträger Straße (nah, fern), Schiene, Binnenschiff, Rohrfernleitung, Seeschiff, Luft ermittelt und gehen neben der Wirtschafts- und der Personenverkehrsentwicklung in die Jülicher Modelle ein.



**Abb. D 5: Verkehrsmodul: Güterverkehr**

Die drei Module sind miteinander verbunden, wenn auch nicht immer ein direkter Datenfluß zwischen diesen Modulen besteht. Bei der Modellgestaltung wurde im Sinne eines kybernetischen Ansatzes darauf geachtet, daß die Outputdaten eines jeden Moduls zu den Annahmen für die anderen Module nicht im Widerspruch stehen.

### D 3. JES – Das Jülicher Energiemodellsystem

#### D 3.1 Vorbemerkung

Die im Rahmen dieser Studie verwendeten Modelle für den Energiesektor entstammen dem von der STE in den letzten Jahren entwickelten Energiemodellsystem JES, das ein Instrumentarium zur Analyse langfristiger, zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland und anderer Volkswirtschaften darstellt.

Im Rahmen des FAT-Projektes werden Teile des JES verwendet, die für die spezifischen Fragestellungen weiterentwickelt worden sind. Das System JES besteht aus den beiden Komponenten

#### LESS und MARKAL

Das dynamische Simulationsmodell LESS (Langfrist-Energie-Simulations-System) kann als Technologie- und Strategie-Modell zur Berechnung der langfristigen Entwicklung, insbesondere der Energienachfrage und der Struktur der Energieversorgung, charakterisiert werden. Abb. D 6 zeigt in einer Übersicht das Zusammenwirken der verschiedenen Module von LESS. Im Mittelpunkt stehen die Module Energiebedarf und Energieversorgung, also die beiden wesentlichen Aggregate, durch die sich die Nachfrage- und Angebotsbeziehungen nach Energieträgern bestimmen und die Auswirkungen von technologischen Veränderungen bei der Gewinnung, Umwandlung, Verteilung und Nutzung von Energieträgern darstellen lassen.

Aus LESS findet der Energiebedarfsmodul (gestrichelter Bereich) Verwendung, der entsprechend der FAT-Fragestellung modifiziert und weiterentwickelt worden ist.

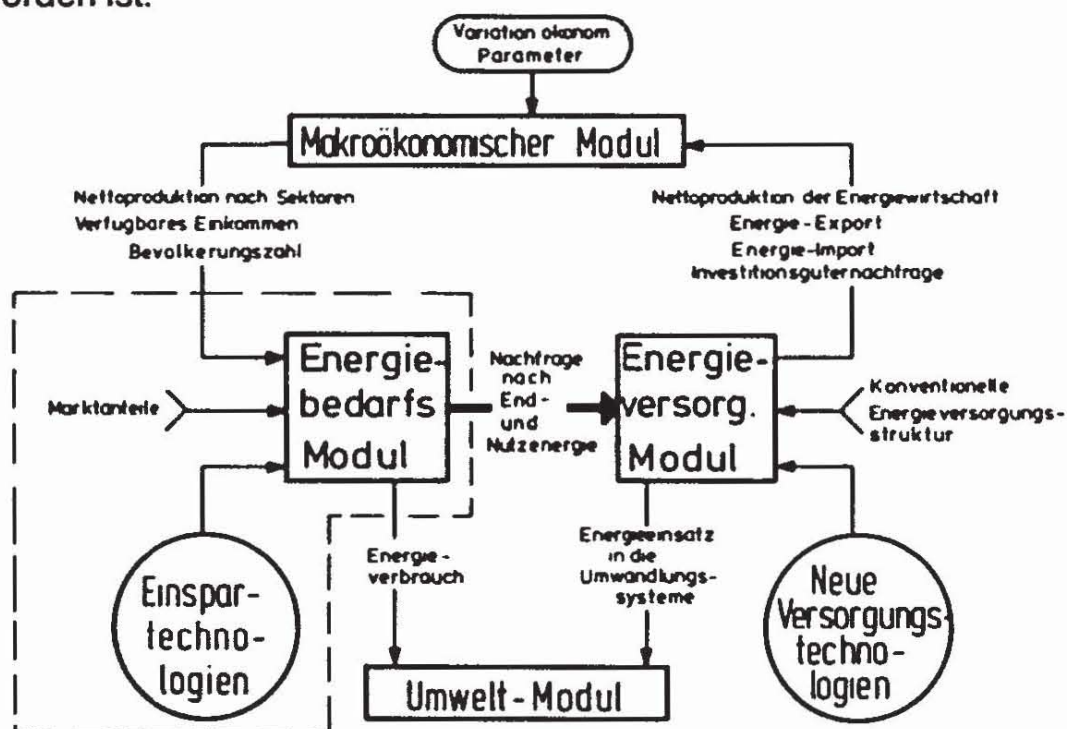
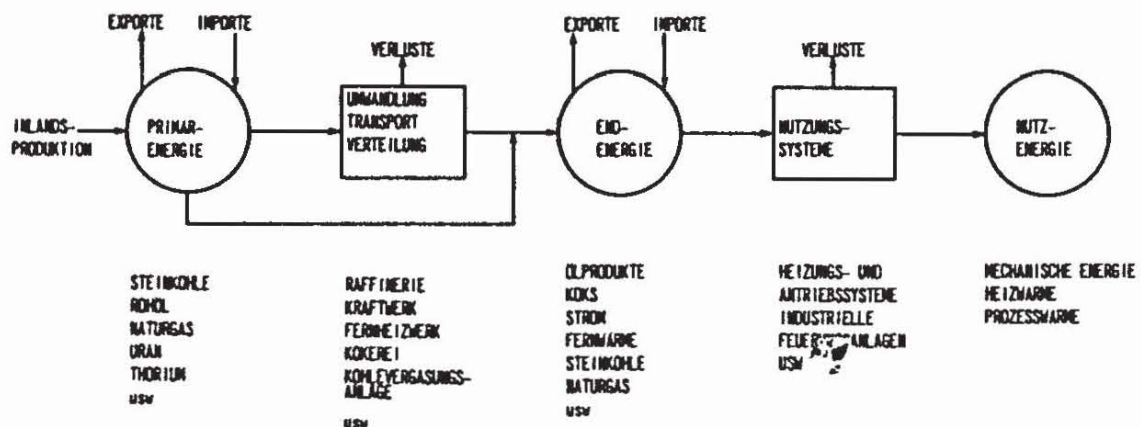


Abb. D 6: LESS – Langfristiges Energie-Simulations-System

MARKAL (für *Market Allocation*), ein dynamisiertes lineares Optimierungsmodell, stellt eine Abbildung des *gesamten* Systems von der Nutzenergie bis zur Primärenergie dar (Abb. D 7).



**Abb. D 7: Blockstruktur der Abbildung des Energiesystems im MARKAL-Modell**

Für die speziellen Fragestellungen des FAT-Forschungsprogramms wird der Energiebedarfsmodul des Simulationsmodells mit dem MARKAL-Modell gekoppelt. Diese neue Art des Zusammenwirkens der Modelle wird auch im Hinblick auf die Tatsache gewählt, daß die makroökonomischen Rechnungen vom Industrieseminar Mannheim mit einem speziellen Modell durchgeführt werden. Damit sind die Nettoproduktion nach Sektoren, das verfügbare Einkommen und die Bevölkerungsentwicklung exogene Variable für den Energiebedarfsmodul. Die mit dem Energiebedarfsmodul ermittelte sektorale Nachfrage an Nutz- bzw. Endenergie wird dem MARKAL-Modell als exogener Variablenset zur Verfügung gestellt.

Mit Hilfe dieser Modellkonfiguration erhält man ein leistungsfähiges Instrumentarium, das Aussagehilfen bzgl. des Ausbaus der Energieversorgung, der Substitution zwischen Energieträgern und der Entwicklung im Bereich der Endbenutzertechnologien liefert. Dabei erfolgt die Bewertung einzelner Technologien *nicht isoliert*, d. h. nach betriebswirtschaftlicher Einzelrechnung, sondern im *Systemzusammenhang* unter Berücksichtigung der vielfältigen Interdependenzen in der Energiewirtschaft.

Im folgenden werden zunächst das Energiebedarfsmodell, dann das MARKAL-Modell näher erläutert. Darauf folgt eine Beschreibung der Kopplung der beiden Modelle.

### D 3.2 Das Energiebedarfsmodell

Im Rahmen des FAT-Forschungsvorhabens war es erforderlich, neben Weiterentwicklungen am bestehenden Energiebedarfsmodell einen zusätzlichen Verkehrsmodul zu entwickeln und zu integrieren.

### **D 3.2.1 Aufgabe und Struktur des Modells**

Die Aufgabe dieses Modells ist es, mit Hilfe von sozioökonomischen Bestimmungsgrößen die zeitabhängigen, sektoralen und nach Verwendungszwecken differenzierten Nutz- bzw. Endenergiebedarfswerte zu ermitteln.

Dabei wird der Ansatz, die wirtschaftliche Leistung der Volkswirtschaft mit dem Energiebedarf in Beziehung zu setzen, insofern erweitert, als die Zusammenhänge zwischen volks- und betriebswirtschaftlichen Größen und dem Energiebedarf für jede Verbrauchergruppe (Sektor) getrennt dargestellt wird – einschließlich der Verflechtungen zwischen diesen Bereichen. Die wesentlichen Beziehungen zwischen den im Modell abgebildeten Größen sind

- die sozioökonomischen Verknüpfungsgleichungen und
- die Kapazitätsgleichungen.

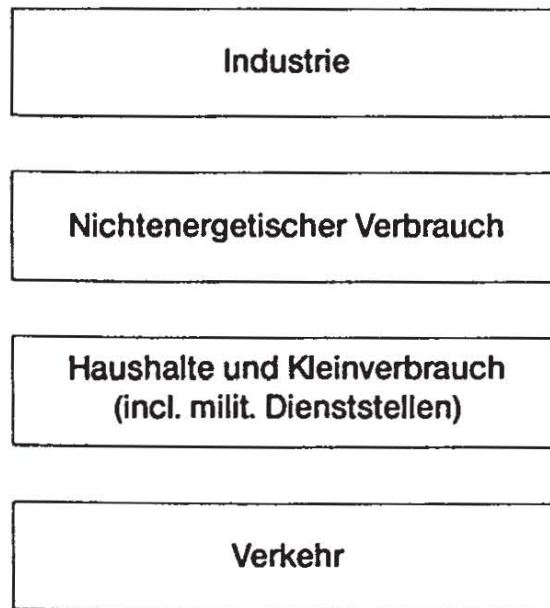
Die sozioökonomischen Verknüpfungsgleichungen bilden den Zusammenhang zwischen Nettoproduktion der Industriesektoren sowie der Petrochemie (nichtenergetischer Verbrauch) und dem End- bzw. Nutzenergiebedarf ab. Zudem werden im Haushalts- und Kleinverbrauchersektor ausgehend von der Bevölkerungsentwicklung und dem verfügbaren Einkommen die Anzahl der Wohneinheiten und die zu beheizenden Flächen ermittelt. Aus diesen Größen errechnet das Modell mit Hilfe spezifischer Energieverbräuche, die mit Hilfe angenommener Wärmedämmmaßnahmen exogen fortgeschrieben werden, die Nutzenergienachfrage an Niedertemperaturwärme. Die Kapazitätsgleichungen erlauben eine Aufteilung der Wohneinheiten in Neu- und Altbauten dadurch, daß sich zu jedem Zeitschritt die Anzahl der Wohneinheiten errechnet aus der Anzahl zum vorhergehenden Zeitschritt vermehrt um den Zubau und vermindert um den Abriß im jeweiligen Zeitschritt.

Der neu in das Bedarfsmodell aufgenommene Verkehrsmodul ist entwickelt worden, um aus der Vorgabe der Transportleistung im Personen- bzw. im Güterverkehr eine Nachfrage an Nutzenergie (Nutzenergiedefinition siehe Beschreibung des Verkehrssektors) zu ermitteln.

Damit gibt es zwei qualitativ unterschiedliche Übergabegrößen des Bedarfsmoduls an das MARKAL-Modell:

1. Endenergiewerte für die Eisenschaffende Industrie und den Nichtenergetischen Verbrauch.
2. Nutzenergiewerte für die Sektoren Haushalte, Kleinverbrauch und Verkehr sowie die übrige Industrie.

Die in Abb. D. 8 gezeigten Sektoren werden im folgenden in ihrer modellmäßigen Behandlung detaillierter beschrieben.



**Abb. D 8: Sektoren des Energiebedarfsmodells**

### **D 3.2.2 Der Industriesektor**

Der Industriesektor wird ausgehend von der Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland in folgende Sektoren unterteilt:

- Steine und Erden
- Eisenschaffende Industrie
- NE-Metallerzeugung, -halbzeugwerke, -gießereien
- Chemische Industrie
- Zellstoff-, Papier- und Pappeerzeugung
- Übriges Grundstoff- und Produktionsgütergewerbe
- Investitionsgüterproduzierendes Gewerbe
- Verbrauchsgüterproduzierendes Gewerbe
- Nahrungs- und Genußmittelgewerbe

In der Abgrenzung des Bedarfsmoduls umfaßt der Sektor Übriges Grundstoff- und Produktionsgütergewerbe die Sektoren Eisen-, Stahl- und Tempergießereien, Kaltwalzwerke und Übriges Grundstoff- und Produktionsgütergewerbe nach der Aggregation der Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland.

Da besonders in der Industrie nahezu jede wirtschaftliche Aktivität den Einsatz von Energie erforderlich macht, ist der Energieverbrauch der Industrie eng an die ökonomische Entwicklung der Industriesektoren geknüpft, die sich wertmäßig in der Nettoproduktion widerspiegelt. Die Nettoproduktionswerte (Beiträge zum Bruttoinlandsprodukt) der einzelnen Sektoren werden vom makroökonomischen Modell (ISM Mannheim) an das Bedarfsmodell übergeben, wo unter Berücksichtigung wirksam werdender Einsparererfolge der End- bzw. Nutzenergieverbrauch in den neun industriellen Bereichen errechnet wird. Hierbei wird für alle Sektoren eine detaillierte Berechnung über ein-

zelne angewandte Verfahren angestrebt, so wie in der Eisenschaffenden Industrie, wo verschiedene Prozeßschritte zur Erzeugung der sektortypischen und energieintensiven Produkte abgebildet sind und damit eine entsprechende Berechnung von spezifischem Endenergieverbrauch und Einsatzanteilen der Energieträger erlauben. Bisher ist diese verfahrens- und produktionsbezogene Simulation der Energieflüsse allerdings nur in diesem Sektor realisiert. Die Ermittlung des spezifischen Nutzenergieverbrauchs (d. h. im wesentlichen Prozeßenergie) erfolgt für die übrigen Sektoren (alle, außer Eisenschaffende Industrie) in zwei Schritten:

1. Schritt: Der Nutzenergieverbrauch wird errechnet aus einer hyperbolischen Korrelation mit der Nettoproduktion, und anschließend wird der spezifische Energieverbrauch bestimmt.
2. Schritt: Der so errechnete spezifische Nutzenergieverbrauch dient als Anhaltspunkt für die Abschätzung seiner Entwicklung in Abhängigkeit von den Szenariodefinitionen.

### **D 3.2.3 Der Sektor Nichtenergetischer Verbrauch**

Der nichtenergetische Verbrauch ergibt sich aus dem Bitumen- und Schmierstoffbedarf sowie der Rohstoffnachfrage der petrochemischen Industrie. Der Bitumenbedarf ergibt sich im wesentlichen durch die Abschätzung der Aktivität des Straßen- und Hochbaus. Der Schmierstoffbedarf korreliert sowohl mit der Transportleistung des Verkehrssektors als auch mit der Nettoproduktion der Industrie insgesamt. Die Rohstoffnachfrage der Petrochemie wird mit Hilfe einer linearen Korrelation aus der inländischen Produktion von Primärchemikalien ermittelt. Die Anteile der einzelnen Energieträger am Verbrauch werden zunächst grob abgeschätzt und dann iterativ mit den Optimierungsläufen des MARKAL-Modells korrigiert.

### **D 3.2.4 Der Sektor Haushalte und Kleinverbrauch**

Die im MARKAL-Modell bestehende Abbildung erfordert Daten für die folgenden vier Subsektoren:

- Raumheizung Ein- und Zweifamilienhäuser
- Raumheizung Mehrfamilienhäuser
- Warmwasserbedarf Haushalte und Kleinverbrauch
- übriger Verbrauch Haushalte und Kleinverbrauch

Der Wohnungsbestand ist determiniert durch die Zahl der Haushalte unter der Annahme: jedem Haushalt eine zu beheizende Wohnung. Die Abrißtätigkeit wird szenariospezifisch exogen vorgegeben. Über die Bestandsgleichung

Wohnungsbestand ist gleich  
Vorjahresbestand zuzüglich Neubauten  
abzüglich Abriß



ergibt sich die jährliche Zahl der Neubauten. Die Größe der Neubauwohnungen wird über eine Korrelation mit dem verfügbaren Einkommen bestimmt.

Der sonstige Energieverbrauch der Haushalte wird im Modell aus dem verfügbaren Einkommen ermittelt. Die Nettoproduktionswerte von Landwirtschaft, Gewerbebetrieben und Kleinindustrie (bis 20 Beschäftigte) sowie die Wertschöpfung des öffentlichen Bereiches bestimmen den Energieverbrauch des Sektors Kleinverbrauch. Der sonstige Energieverbrauch der Haushalte und der Energieverbrauch des Sektors Kleinverbrauch werden über einen Modal-Split auf die im MARKAL-Modell gewählte Einteilung in Warmwasserbedarf und übriger Verbrauch aufgeteilt.

### **D 3.2.5 Der Verkehrssektor**

Der Submodul Verkehr des Simulationsmodells verarbeitet die aus dem vorgelagerten makroökonomischen Modell übergebenen Verkehrsleistungen in folgender Weise:

Die einzelnen Anteile der Gesamtverkehrsleistungen (angegeben in Personen- bzw. Tonnenkilometern) werden entsprechend Abb. D 9 entweder aufgeteilt (z. B. Pkw-Klassen eins bis vier) oder aggregiert (siehe Aggregat Schiene-Wasser-Luft).

Dann erfolgt eine Umrechnung auf Nutzenergienachfrage für die Pkws in 4 Klassen, für die Lkws in 6 Klassen, für die Busse in 2 Klassen. Für das Aggregat Schiene, Wasser, Luft wird die *Endenergienachfrage* bestimmt.

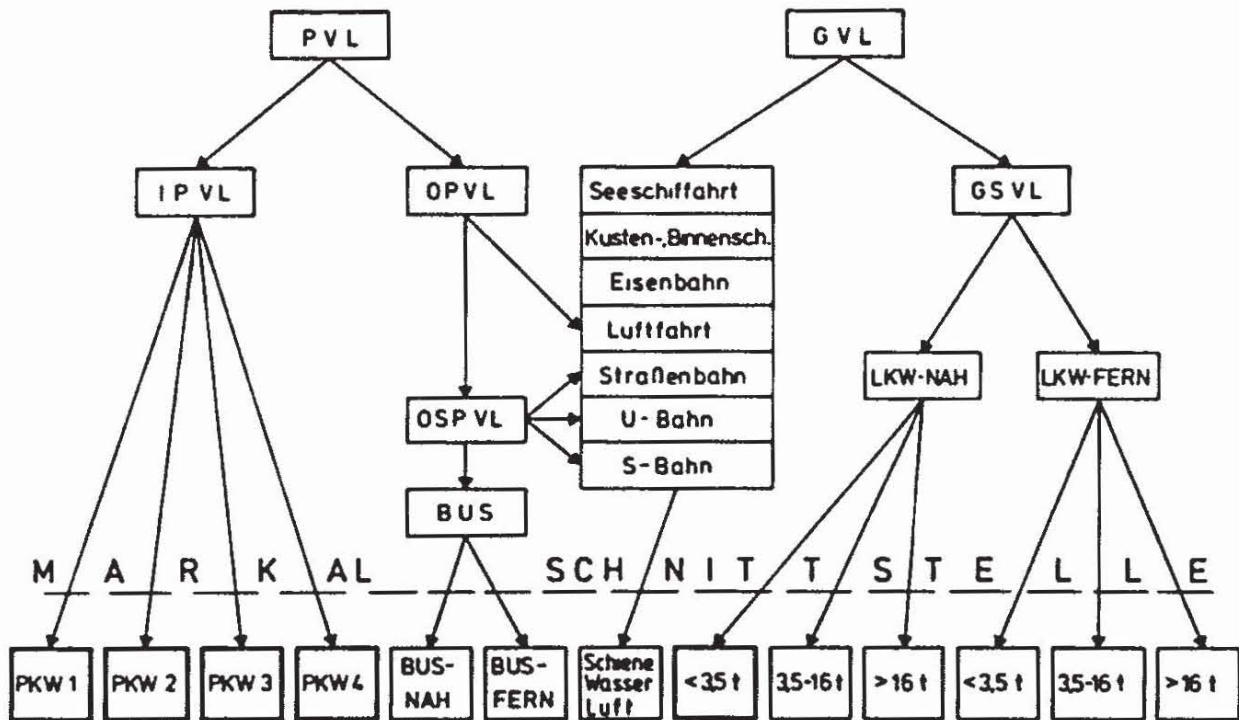
Für jede Fahrzeug-Klasse wird ein Durchschnittsverbrauchswert für das Modellstartjahr (1980) ermittelt. Danach erfolgt eine Umrechnung der Verbrauchswerte dergestalt, daß zunächst für den Durchschnitt aller Fahrzeuge einer Klasse ein Nutzungsgrad von 10% für das Modellstartjahr definiert wird. Entsprechend den unterschiedlichen Verbrauchswerten der unterschiedlichen Antriebssysteme ergibt sich dann ein jeweils auf 10% normierter Nutzungsgrad, der wiederum einhergehend mit der Entwicklung des technischen Verbrauchs zeitlich fortgeschrieben wird.

Neben den Verkehrsleistungen und den Zeitreihen des technischen Verbrauchs sind die weiteren Inputdaten für den Verkehrsmodul: Basiskosten der Fahrzeuge sowie Zusatzkosten für alternative Antriebe, Fahrleistungen, Verteilungskosten der Kraftstoffe und Steuern auf Kraftstoffe.

Damit werden die MARKAL-spezifischen Technologiedaten, wie sie im Beispiel unter Punkt D 3.3.7 dieses Anhangs beschrieben sind, ermittelt.

Analog zu der Vorgehensweise bei den Pkw wird bei Lkw und Bussen sowie bei dem Aggregat Schiene-Wasser-Luft verfahren.

Die in Abb. D 9 fett eingerahmten Übergabegrößen sind die Nutzenergievorgaben, die durch den im MARKAL-Modell zu optimierenden Endbenutzer-technologiemix (hier also: Pkw und kleine Nahverkehr-Lkw) befriedigt werden. Die nicht fett eingerahmten Übergabegrößen sind nicht Gegenstand der Optimierung. Für Busse, Fernverkehr-Lkw und große Nahverkehr-Lkw werden lediglich die Nutzenergienachfragewerte sowie die Zeitreihen der Nutzungsgrade der Diesellaggregate ermittelt.



**Legende:**

- PVL - PERSONENVERKEHRSLAISTUNG
- GVL - GÜTERVERKEHRSLAISTUNG
- IPVL - INDIVIDUELLE PERSONENVERKEHRSLAISTUNG
- OPVL - ÖFFENTLICHE PERSONENVERKEHRSLAISTUNG
- OSPVL - ÖFFENTLICHE STRASSENPERSONENVERKEHRSLAISTUNG
- GSVL - GÜTER-STRASSEN-VERKEHRSLAISTUNG

**Abb. D 9: Struktur der Verkehrsleistung und Übergabegrößen an das MARKAL-Modell**

**D 3.3 Das MARKAL-Modell**

**D 3.3.1 Aufgabe und Struktur des Modells**

Aufgabe des Modells ist es, den hinsichtlich verschiedener Zielgrößen und Restriktionen jeweils „optimalen“ Technologie- und Energiemix zu bestimmen. Aufgrund von Erfahrungen in der Entwicklung von Energiemodellen zeigte sich, daß für diese Aufgabenstellung insbesondere LP-Modelle ge-

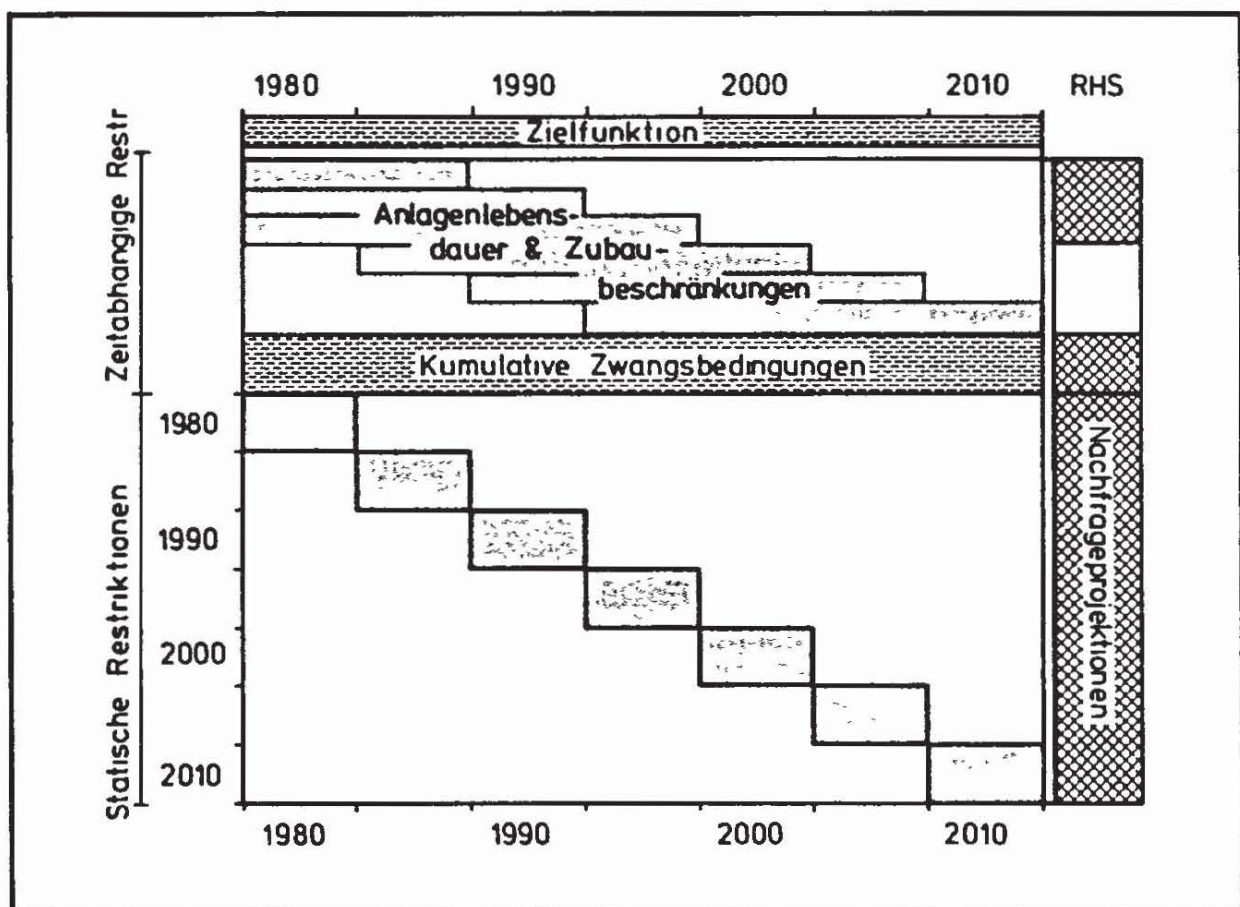
eignet sind. Denn viele Beziehungen in der Energiewirtschaft sind entweder linear oder lassen sich hinreichend genau durch lineare Beziehungen approximieren.

Das Modell stellt eine Abbildung des *gesamten Energiesystems* und seiner *Interdependenzen* von der Nutzenergie über den Endbenutzer-, Transport-, Umwandlungsbereich bis zur Primärenergie dar (vgl. Abb. D 7 dieses Anhangs).

Die Umwandlungs- und Endbenutzertechnologien (Nutzungssysteme) werden im Modell durch charakteristische Größen wie Investitionskosten, variable und fixe Kosten, Wirkungsgrade, maximale Auslastung, technische Lebensdauer, Energieträgerinput- und Energieträgeroutputparameter abgebildet (vgl. Beispiel unter Punkt D 3.3.7 dieses Anhangs).

Weitere ökonomische Daten des Modells sind die Preise der Energieträger, die importiert bzw. exportiert werden können, Transportkosten für Energieträger sowie die Kosten für die Energieträger aus heimischer Förderung.

Das Modell ist als lineares, Mehrperioden-Optimierungsmodell formuliert. Das Energiesystem wird nicht nur zu einem einzigen Zeitpunkt, sondern in seiner Entwicklung über mehrere miteinander verbundene Planungszeiträume von



**Abb. D 10: MARKAL – Matrixstruktur des Mehrperiodenmodells**

jeweils 5 Jahren abgebildet. Die gesamte Planungslänge erstreckt sich dabei auf die Intervalle von 1980 bis 2010. Die Matrixstruktur des Modells ist in Abb. D 10 dargestellt.

Die zu *minimierende Zielfunktion* des Modells berechnet die auf den Startzeitpunkt bezogenen, *abdiskontierten Kosten* des *gesamten Energiesystems* (Barwert) über die *gesamte Planungslänge*.

Das bedeutet, daß ein integrales Optimum sowohl der Produktions- und Umwandlungsseite (Bergbau, Kraftwerke, Raffinerien etc.) als auch der Endbenutzerseite (Ölbrenner, Wärmepumpe, Elektroheizung, Benzin-Pkw, LPG-Pkw etc.) einschließlich der vielfältigen Interdependenzen ermittelt wird.

Diese Interdependenzen sind einerseits durch Marktmechanismen der abgebildeten Energiewirtschaft gegeben (z. B. Verflechtung des Raumheizungssektors mit dem Verkehrssektor über den Raffineriesektor). Andererseits bestehen zeitliche Interdependenzen derart, daß z. B. Investitionen zu Anfang des Planungszeitraums die Entwicklungsrichtung in späteren Perioden beeinflussen.

Die prinzipielle Funktionsweise des Modells läßt sich so beschreiben, daß ausgehend von der Vorgabe der zeitlichen Entwicklung des Energiebedarfs (Nutz- bzw. Endenergiebedarfswerte) der optimale Zubau von Energietechnologien (Umwandlungs- *und* Endbenutzerseite) und der optimale Einsatz an Primärenergieträgern unter Berücksichtigung von Interfuel-Substitution und der Einhaltung von Nebenbedingungen (Restriktionen) berechnet wird.

Diese Restriktionen lassen sich grundsätzlich in zwei Arten unterteilen (vgl. Abb. D 10):

- zeitabhängige bzw. dynamische Restriktionen
- statische Restriktionen.

Die dynamischen Restriktionen bestehen aus

- Anlagelebensdauer- und Zubaubeschränkungen sowie
- kumulativen Zwangsbedingungen.

*Anlagelebensdauerbeschränkungen* legen fest, daß die zu einem bestimmten Zeitpunkt getätigten Ersatz- und Erweiterungsinvestitionen eines Anlagentyps nur mit ihrer ökonomischen Lebensdauer im System zur Verfügung stehen.

Die *zubaubeschränkenden Restriktionen* limitieren die Markteinführung neuer Technologien auf eine Wachstumsfunktion. D. h. natürlich nicht, daß die betreffenden Technologien diese obere Grenze erreichen. Vielmehr ergibt sich der tatsächliche Beitrag einer Technologie aus der Konkurrenz mit den jeweiligen Alternativtechnologien innerhalb der durch die Kurve gestatteten Bandbreite.

**Kumulative Beschränkungen** als dritter Typ dynamischer Restriktionen können für Gewinnung und Import von Energieträgern formuliert werden. In dieser Art sind z. B. die Gaslieferungsverträge mit dem Ausland abgebildet: Die vertraglich gesicherte Lieferung bis zum Jahre 2010 ist als kumulative Gesamtmenge vom Modell zu importieren, wobei die Ausnutzung der Flexibilität der Importe im Rahmen der vertraglich vereinbarten Schwankungsbreite Gegenstand der Optimierung ist.

Die *statischen Restriktionen* bilden die blockdiagonale Struktur im unteren Teil der Matrix (Abb. D 10) und sind in drei Typen zu klassifizieren:

- Bilanzrestriktionen
- technische Restriktionen
- Restriktionen politischer und energiewirtschaftlicher Art.

Die *Bilanzrestriktionen* stellen sicher, daß zu jedem Zeitpunkt die Nachfrage bzgl. eines bestimmten Energieträgers, die sich zusammensetzen kann aus exogener Vorgabe und endogen im Modell erzeugter Nachfrage durch „in Lösung kommende“ Technologien, durch Produktion, Import oder Förderung gedeckt wird.

*Technische Restriktionen* sind von unterschiedlichster Art: Wartungsrestriktionen stellen sicher, daß bei jeder Technologie die Auslastung auf das für Wartungs- und Ausfallzeiten nötige Maß begrenzt wird. Spitzenlastrestriktionen sorgen dafür, daß für jeden der im Modell abgebildeten Lastbereiche (gilt für Strom und Fernwärme) genügend Kapazität einschließlich der benötigten Reserve bereitsteht. Weitere Restriktionen dieses Typs bewirken z. B., daß beim Einsatz von Wärmepumpen zur Raumheizung im Haushaltssektor genügend Kapazität an Öl- oder Gas-Zusatzheizungen bereitstehen.

Ein Beispiel für eine *Restriktion politischer bzw. energiewirtschaftlicher Art* ist der im Modell abgebildete Verstromungsvertrag.

*Outputgrößen* des Modells sind:

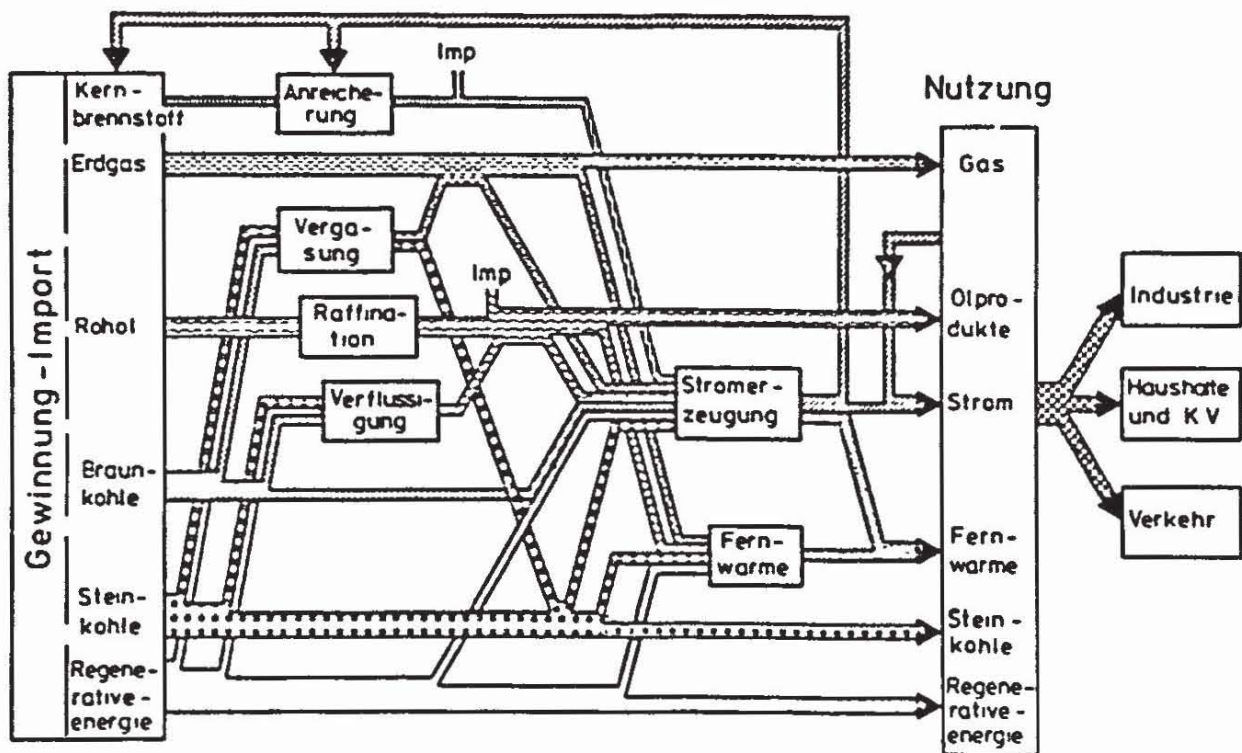
- Menge der geförderten, exportierten und importierten Energieträger
- Kapazitäts- und Zubauzeitreihen der Technologien
- Verbrauch der Energieträger durch Umwandlungs- und Endbenutzertechnologien
- Erzeugung an Energieträgern durch die Umwandlungstechnologien
- Bereitstellung an Nutzenenergie durch Endbenutzertechnologien.

Damit ist es möglich, Primär-, End- und Nutzenergiebilanzen aufzustellen.

Aussagen über Preise bzw. Kosten von abgeleiteten (d. h. im Modell endogenen) Energieträgern lassen sich insbesondere auch wegen der Kuppelproduktionsproblematik nicht machen. So kann z. B. der Energieträger

Methanol entweder importiert (zum Importpreis) oder auf dreierlei Weise hergestellt werden: Mit der Rückstandsvergasung mit anschließender Methanolsynthese im Raffineriebereich, mit der Steinkohle- und Braunkohleveredlung. Das Modell wählt die kostengünstigste Bereitstellung des Methanols unter Berücksichtigung einer alternativen Verwendung der Einsatzenergien (z. B. zur Stromerzeugung). Eine preisliche Bewertung des Methanols ist damit nicht erforderlich und steht explizit nicht zur Verfügung.

Das statische System der Energieversorgung wird durch das in Abb. D 11 gezeigte Flußdiagramm vereinfachend dargestellt.



**Abb. D 11: MARKAL-Hauptsektoren und Energieflüsse des Modells**

Der Detaillierungsgrad der für das FAT-Forschungsvorhaben verwendeten MARKAL-Version ergibt eine Matrixgröße von etwa 3 000 Variablen und 2 500 Restriktionen mit einer Besetzungsdichte der Matrix von etwa 0,15%.

Im folgenden wird eine kurze Beschreibung der abgebildeten Sektoren gegeben.

### D 3.3.2 Endbenutzertechnologien

Der wichtigste (weil nachfrageintensivste) Bestandteil des Nutzungssektors ist der Bereich der Raumheizung, der die wesentlichen neuen Technologien, wie etwa die elektrische oder gasbetriebene Wärmepumpe und die Sonnenheizung umfaßt.

Im Verkehrssektor sind neben der Konkurrenz zwischen Diesel- und Vergaserkraftstoff neue Kraftstoffe, wie Wasserstoff oder Methanol oder auch die Elektrotraktion, wichtige Bestandteile der Optimierungsrechnungen.

Der Industriesektor ist in die beiden Bereiche Eisenschaffende Industrie und übrige Industrie aufgeteilt. In der Eisenschaffenden Industrie findet eine Optimierung nur in dem Sinne statt, daß im Bereich von den durch das Simulationsmodell übergebenen Ober- und Untergrenzen Substitutionen zwischen den Energieträgern stattfinden können, die nur durch die Kostenrelationen der Energieträger zueinander bestimmt werden. In der übrigen Industrie erfolgt eine Optimierung bei der Bereitstellung von Prozeßwärme, wobei Investitionskosten, Wirkungsgrade, technische Lebensdauer etc. in die Optimierung eingeben.

Obwohl der Nutzungssektor in der Abbildung nicht weiter aufgegliedert ist, umfaßt er etwa 100 Technologien zur Bedarfsdeckung. Davon sind 65 im Rahmen des FAT-Forschungsvorhabens neu aufgenommene Technologien des Straßenverkehrssektors (48 Pkw, 13 Lkw- und 2 Bus-Technologien).

### **D 3.3.3 Elektrizitäts- und Fernwärmeerzeugung**

Im Kraftwerksbereich wird sowohl die Stromerzeugung in den Kraftwerken als auch die Strom- und Wärmeerzeugung auf Basis der Wärme-Kraft-Koppelung betrachtet, wobei auch neue Technologien wie Wirbelschichtfeuerung, Gas-Dampf-Kombiprozeß, Windkraftwerk und Hochtemperaturreaktor berücksichtigt werden (Beschreibung der Kraftwerkstypen: vgl. FAT-Bericht Nr. 25 „Energie für den Verkehr“ Kapitel 9.4.1 bzw. 9.4.2).

Wichtig im Zusammenhang mit der aus Koppelproduktion erzeugten Fernwärme ist die Bereitstellung dieser Wärme für die Raumheizung und die Niedertemperaturprozeßwärme in Industrie und Kleinverbrauch. Dabei spielen die Kosten der Wärmeverteilung eine wichtige Rolle, d. h. die Frage der Energiedichte bzw. der Verbrauchsdichte ist entscheidend für den Erfolg dieser Technologie in Konkurrenz mit anderen.

Im Stromsektor existiert eine Abbildung in sechs Lastbereiche:

1. Wintertag
2. Winternacht
3. Übergangszeit-Tag
4. Übergangszeit-Nacht
5. Sommertag
6. Sommernacht.

Im Fernwärmesektor werden drei Lastbereiche unterschieden:

1. Winter
2. Übergangszeit
3. Sommer.

### **D 3.3.4 Raffineriesektor**

Die im vorhandenen Modell stark vereinfacht abgebildete Mineralölverarbeitung wird erheblich detaillierter dargestellt. Neben der atmosphärischen und der Vakuum-Destillation existieren nun im Modell 7 weitere Prozesse: Platformer, Catcracker, Coker, Thermocracker, Hydrocracker, Visbreaker sowie die Rückstandsvergasung/Methanolsynthese. Außerdem sorgen 4 weitere Prozesse dafür, daß die verschiedenen Produktqualitäten der Mineralölprodukte im Modell kostenmäßig erfaßt werden. (Einzelheiten können dem Kapitel 9.4.3.1 des Berichts Nr. 25 der FAT „Energie für den Verkehr“ entnommen werden.)

Diese Modellerweiterungen wurden aus zwei Gründen durchgeführt: Einmal erfordert eine gute Aussagequalität bzgl. des stark disaggregierten Verkehrssektors eine entsprechend genaue Abbildung des Raffineriesektors. Dies gilt insbesondere auch deswegen, weil über den Raffineriesektor der Verkehrssektor und der Haushaltssektor (z. B. Nachfrage nach Heizöl leicht bzw. Dieselkraftstoff) eine starke Interdependenz aufweisen.

Zum anderen ist eine möglichst genaue Abbildung der Gegebenheiten im Raffineriesektor notwendig, um die Wettbewerbsmechanismen zwischen Mineralölverarbeitung und Kohleveredlung erfassen zu können.

### **D 3.3.5 Kohleveredlung**

Im Umwandlungssektor zeigt das *Steinkohle*-Subsystem die drei herkömmlichen Nutzungsformen Stromversorgung, Fernwärmeerzeugung und Endverbrauch. Die Verkokung, die auch einen Beitrag zum Gassystem liefert, ist hier der Übersichtlichkeit halber nicht aufgeführt. Der Endverbrauch an Steinkohle setzt sich vor allen Dingen aus dem Bedarf der Eisen- und Stahlindustrie sowie der direkten Industriefeuerungen, dem Kohleeinsatz zur Heizung und für den Eisenbahn- und Schiffstransport zusammen. Hinzu treten als neue Technologien die Verflüssigung der Kohle, mit der Mineralöl ersetzt wird, und die Vergasung, die durch synthetisches Naturgas die Gasbasis verbreitert. Verschiedene Prozesse zur Gewinnung flüssiger und gasförmiger Brennstoffe aus Kohle sind im Modell berücksichtigt, darunter auch solche, die nukleare Prozeßwärme nutzen. Die sich damit ergebende Verbindung zum Nuklearbrennstoffkreislauf ist in Abb. D 11 nicht mitaufgeführt.

*Braunkohle* wird zur Zeit fast ausschließlich zur Stromerzeugung eingesetzt. Als neue Verarbeitungsmöglichkeiten kommen Vergasung und Verflüssigung hinzu.

Die nähere Beschreibung der betrachteten Veredlungstechnologien und der Interdependenzen zwischen Kohleveredlung und Kraftwerkssektor ist in den Kapiteln 9.4.4 und 9.5.5 des FAT-Berichts Nr. 25 erfolgt.



### D 3.3.6 Primärenergiegewinnung und Importe

Die Primärenergiegewinnung wird mit den Daten für die spezifischen *Gewinnungskosten*, der Angabe von Ober- und Untergrenzen sowie maximaler Steigerungsraten für die Förderung und gegebenenfalls mit kumulativen Mengenangaben abgebildet. Kumulative Mengenangaben bedeuten, daß dem Modell eine Gesamtmenge der Förderung im Betrachtungszeitraum vorgegeben wird und das Modell eine Verteilung über die Zeit (u. U. innerhalb gewisser vorzugebender Bandbreiten) selbst vornimmt.

Für die Importe (und auch die Exporte) müssen die *Preise* der Energieträger exogen vorgegeben werden. Hier gibt es ebenfalls die Möglichkeit, Ober- und Untergrenzen sowie Steigerungsraten und kumulative Gesamtmengen (vgl. Gasverträge) vorzugeben.

### D 3.3.7 Beispiel einer Technologieabbildung

Als typisches Beispiel einer Technologieabbildung diene die Abb. D 12, die die Modelldaten eines Methanol-M100-Pkws der Mittelklasse darstellt.

Neben den technischen Daten in der Tabelle DMD (Wirkungsgrad und die Angabe, daß der Input Methanol bzw. Alkohol beträgt) finden sich in der TCH-Tabelle die ökonomischen Daten. In der Spalte TID (time invariant data) sind die Lebensdauer und der frühestmögliche Markteintrittszeitpunkt angegeben (2 für

```
*****
*
*          TNM          R.TRA. METHANOL M 100 CAR          *
*
*****
```

TABLE DMDTNM					
	1	2	3	4	5
EFF	0.0	0.0	.153000	.161000	.170000
MAALC	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
+R	6	7			
EFF	.178000	.187000			
MAALC	1.000000	1.000000			

TABLE TCHTNM					
	TID	1	2	3	4
LIFE	2.000000				
START	3.000000				
GROWTH	.488100	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
BOUNDUP				.097600	
INVCOST		0.0	0.0	2937.8498	3089.5397
DELIVALC		1.593800	1.593800	1.593800	1.593800
FIXOM		0.0	0.0	38.297791	36.350494
+R	5	6	7		
GROWTH	1.000000	1.000000	1.000000		
INVCOST	3246.5598	3411.5598	3587.2099		
DELIVALC	1.593700	1.593700	1.593700		
FIXOM	34.403290	32.780594	31.157898		

**Abb. D 12: Beispiel einer Technologieabbildung (M-100-Pkw, Mittelklasse)**

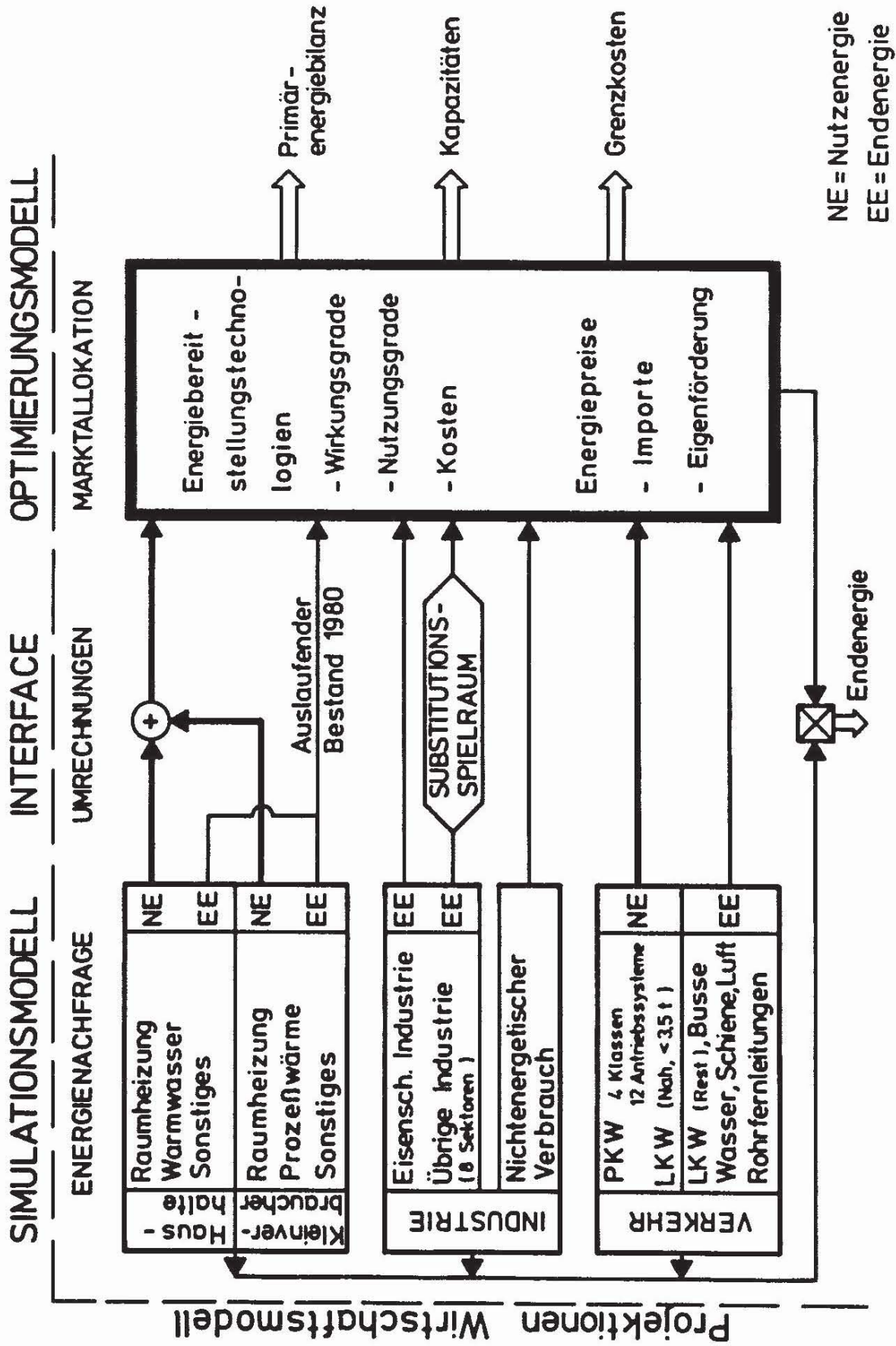


Abb. D 13: Kopplung von Simulations- und Optimierungsmodell

10 Jahre bzw. 3 für Startzeitpunkt 1990). Die Zeilen GROWTH und BOUNDUP begrenzen Wachstumsrate und maximalen Marktanteil. INVCOST und DELIVALC stehen für spezifische Investitionskosten und Verteilungskosten. FIXOM gibt die Daten für die Ermittlung der auf diesen Pkw fallenden Mineralölsteuern und die Wartungskosten an.

### **D 3.4 Die Kopplung des Energiebedarfs- und des MARKAL-Modells**

Die im FAT-Forschungsvorhaben verwendete Modellkonfiguration weist folgenden Informationsfluß auf:

Ausgehend von den Vorgaben aus dem Wirtschaftsmodell (Nettoproduktion nach Sektoren, Verkehrsleistung, Bevölkerungsentwicklung, verfügbares Einkommen der Haushalte) werden Rechnungen mit dem Simulationsmodell durchgeführt. Wie aus den fettgedruckten Pfeilen in Abb. D 13 zu erkennen ist, werden folgende Nutzenergiegrößen vom Simulationsmodell an das Optimierungsmodell übergeben:

- Der Bedarf an Raumwärme, Warmwasser, Licht und Kraft im Sektor Haushalte und Kleinverbrauch
- Die Verkehrsleistung für 4 Pkw-Klassen und für kleine Nahverkehrs-Lkw (3,5 t).

Die übrigen Übergabegrößen (dünngedruckte Pfeile) sind nicht Gegenstand der Optimierung im Bereich der *Endbenutzertechnologien* des MARKAL-Modells und werden als Endenergiezeitreihen übergehen. In den Sektoren „übrige Industrie“ werden Substitutionsspielräume für den Einsatz der Technologien (z. B. Gaswärmepumpe) und der Energieträger zur Erzeugung von Prozeßwärme berechnet und übergeben.

Zur Übergabe dieser Werte wurde eigens für das FAT-Forschungsprogramm ein Interfacemodul geschaffen, der die Ergebnisse des Simulationsmodells in die entsprechende Eingabeform für das LP-Modell umwandelt.

Schließlich mußten Änderungsarbeiten an der vorhandenen Plot-Software zur Darstellung der Szenario-Ergebnisse durchgeführt werden. Damit wurde es möglich, aus den in tabellarischer Form vorliegenden Reports (MARKAL-Ergebnisse) die im Bericht wiedergegebenen (z. T. kumulativen) Graphiken zu erstellen.