Die Energieversorgung des Verkehrs im Kontext der energiewirtschaftlichen Entwicklungsperspektiven*

Alfred Voß

1 Einleitung

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 der in ihm lebenden Bürger. Der Verkehrssektor und die mit ihm verbundenen Bereiche der Fahrzeugindustrie, ihre Zulieferer sowie die Mineralölindustrie gehören zu den wichtigsten Branchen unserer Volkswirtschaft. Allein die Fahrzeugindustrie erwirtschaftet mehr als 10% unseres Bruttosozialprodukts und jeder 7. Arbeitsplatz ist direkt oder indirekt vom Auto abhängig. Neben dieser volkswirtschaftlichen Bedeutung des Bereiches Verkehr, hat die Entwicklung und breite Nutzung von Verkehrs- und Transportmitteln, wie z.B. des Autos, auch unsere Siedlungs- und Flächennutzungsstrukturen entscheidend mitgeprägt. Und nicht zuletzt ist der Verkehrssektor mit einem Anteil von 22% am gesamten Endenergieverbrauch auch ein wesentlicher Energieverbraucher, der zudem wie kein anderer Sektor vom Mineralöl abhängig ist. Es waren und sind die spezifischen Eigenschaften der aus Erdöl gewonnenen Kraftstoffe, wie leichte Speicherbarkeit, hoher Energieinhalt und gute Transportierbarkeit, die mit den bis 1973 nahezu konkurrenzlosen Preisen dazu geführt haben, daß 97% der im Verkehr verbrauchten Energie Mineralölprodukte sind.

In Anbetracht der in den letzten Jahren schmerzlich erfahrenen Probleme der Ölabhängigkeit, der drastisch gestiegenen Ölpreise sowie der begrenzten Reserven dieses Energieträgers gewinnt natürlich die Frage nach der zukünftigen Versorgung des Verkehrssektors mit Energie und in diesem Zusammenhang die Frage nach Alternativen zu ölstämmigen Kraftstoffen eine besondere Bedeutung. Wie für die anderen energieverbrauchenden Sektoren, gelten deshalb auch für den Verkehrssektor die zwei wesentlichen energiepolitischen Ziele des sparsameren sowie rationelleren Einsatzes von Energie und der Reduktion der Ölabhängigkeit. In beide Richtungen sind in den letzten Jahren von der einschlägigen Industrie, unterstützt durch öffentlich geförderte Forschungs- und Demonstrationsvorhaben, erhebliche Anstrengungen unternommen worden.

So konnte z.B. der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch (nach DIN 700030, 1/3 Gewichtung) aller von der deutschen Automobilindustrie im Inland verkauften Neufahrzeuge von 9,8 l/100 km im Jahr 1978 auf 8,7 l/100 km im Jahr 1981, also um 11,2% gesenkt werden. Weitere Reduktionen des spezifischen Kraftstoffverbrauchs durch die Verringerung des Luft- und Rollwiderstandes, die Reduzierung des Fahrzeuggewichtes und die Weiterentwicklung von Motoren und Getrieben sind für die Zukunft zu erwarten.

Die Entwicklung und Erprobung „alternativer" Kraftstoffe einschließlich der angepaßten Motorkonzepte hat ebenfalls erhebliche Fortschritte gemacht, wobei weltweit das Flüssiggas, das Ethanol und das Methanol im Vordergrund des Interesses stehen. Technisch sind heute oder in naher Zukunft marktreife Antriebssysteme und Kraftstoffe verfügbar, die Benzin oder Dieselkraftstoff substituieren könnten. Unklar und umstritten ist aber die zukünftige Bedeutung dieser Kraftstoffalternativen unter anderem deshalb, weil die Energiepreise und die Energieversorgungsstrukturen von morgen heute nicht klar erkennbar sind. Die hieraus resultierende Unsicherheit ist nicht dazu angetan, Investitionen in Milliardenhöhe für die Produktion und Verteilung neuer Kraftstoffe sowie für die Einführung neuer Motoren zu mobilisieren. Da der Verkehrssektor mit den anderen energieverbrauchenden Sektoren um die knapper werdenden konventionellen und die neuen Energieträger konkurriert, kann seine Versorgung mit Energie nicht isoliert von den Entwicklungen der gesamten Energieversorgung, national wie international, analysiert werden. Darüberhinaus sind vielfältige Rückkopplungen zwischen der Entwicklung der Wirtschaft und den Subsektoren Verkehr und Energieversorgung zu beachten.

Im folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse einer systemanalytischen Untersuchung über die zukünftigen Perspektiven des Verkehrssektors und seiner Versorgung mit Energie dargestellt [1]. Ziel der Untersuchung war es, die Energieversorgung des Verkehrssektors und in diesem Zusammenhang die Rolle alternativer Kraftstoffe unter expliziter Berücksichtigung der wechselseitigen Einflüsse zwischen dem Sektor Verkehr, der Wirtschaftsentwicklung und der Energieversorgung zu analysieren. Es ging nicht darum, den vielen Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Verkehrssektors und der Energieversorgung eine weitere hinzuzufügen, sondern es sollte der Versuch unternommen werden, aufbauend auf einer Erfassung der komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen des Systems

*) Zusammengefaßte Darstellung einer Untersuchung, die vom Industrieseminar der Universität Mannheim und der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung der Kernforschungsanlage Jülich im Auftrag von und in Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) durchgeführt wurde. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist unter dem Titel „Energie fur den Verkehr" in der FAT-Schriftenreihe [1] erschienen. Die Studie wurde durchgefuhrt von K. Bellmann, T. Brenner, G. Eickhoff, G.v. Kortzfleisch, W. Mende, D. Sievert, W. Terhorst, A. Voß.

„Wirtschaft – Energie – Verkehr" und unter 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 Mineralöl- und Automobilindustrie abzuleiten [2]. Anders ausgedrückt, es war nicht das Ziel herauszufinden, wieviel methanolbetriebene Fahrzeuge im Jahre 2000 auf den Straßen fahren werden oder wie groß der Bestand an Diesel-Pkw im Jahre 2010 sein wird, sondern es sollten Fragen der Art untersucht werden, ob Methanol angesichts der unsicheren Entwicklungen in der Energieversorgung eine sinnvolle und robuste Alternative zu den konventionellen Kraftstoffen ist, wo die Unsicherheitsmomente für einen Methanoleinsatz im Verkehrsbereich liegen und welche Wirkungen von einem Methanoleinsatz auf die Energieversorgungsstrukturen, z.B. die Kohleveredlung oder die Raffineriestruktur ausgehen. In diesem Sinne sind auch die im folgenden genannten Zahlenangaben z.B. über den Bestand an Methanolfahrzeugen oder die Öleinfuhr im Jahr 2000 nicht als Prognosen zu verstehen, und von weitaus geringerer Bedeutung als die gemeinsamen Entwicklungstrends in den verschiedenen Szenarien. Die alternativen Szenarien spiegeln dabei ein weites Spektrum der für den Verkehrssektor relevanten, aber unsicheren Einflußfaktoren und Entwicklungen wider.

2 Der systemanalytische Ansatz und der Szenariorahmen

Um im Sinne der Zielsetzung die komplexen und sich wechselseitig beeinflussenden Entwicklungen zwischen der Wirtschaft, der Energieversorgung und dem Verkehrssektor quantitativ und konsistent analysieren zu können, wurde ein EDV-gestütztes Modellsystem entwickelt, das die technischen und ökonomischen Zusammenhänge des Systems „Wirtschaft – Energie – Verkehr" beschreibt. Die wesentlichen Module und die Grundstruktur des Modellsystems sind in der *Abbildung 1* schematisch dargestellt.

Der Bevölkerungsmodul quantifiziert die sozio-demographischen Entwicklungen, wie die Entwicklung der Gesamtbevölkerung, der motorisierungsrelevanten Bevölkerung oder die Zahl der Erwerbspersonen. Die Produktionsstruktur der Volkswirtschaft der Bundesrepublik Deutschland wird im Wirtschaftsmodul durch ein institutionell abgegrenztes Input-Output-Modell mit zeitvarianten Koeffizienten abgebildet. Die sektorale Nettoproduktion 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, Binnenschiffahrt und Luftverkehr vorgenommen wird. Ausgehend von den volks- und verkehrswirtschaftlichen Bestimmungsgrößen, wie z.B. der Bevölkerungsentwicklung, der sektoralen Nettoproduktion, dem verfügbaren Einkommen und den Transportleistungen des Personen- und Güterverkehrs, wird im Energiebedarfsmodul die zeitliche Entwicklung der sektoralen Nutz- bzw. Endenergienachfrage 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,

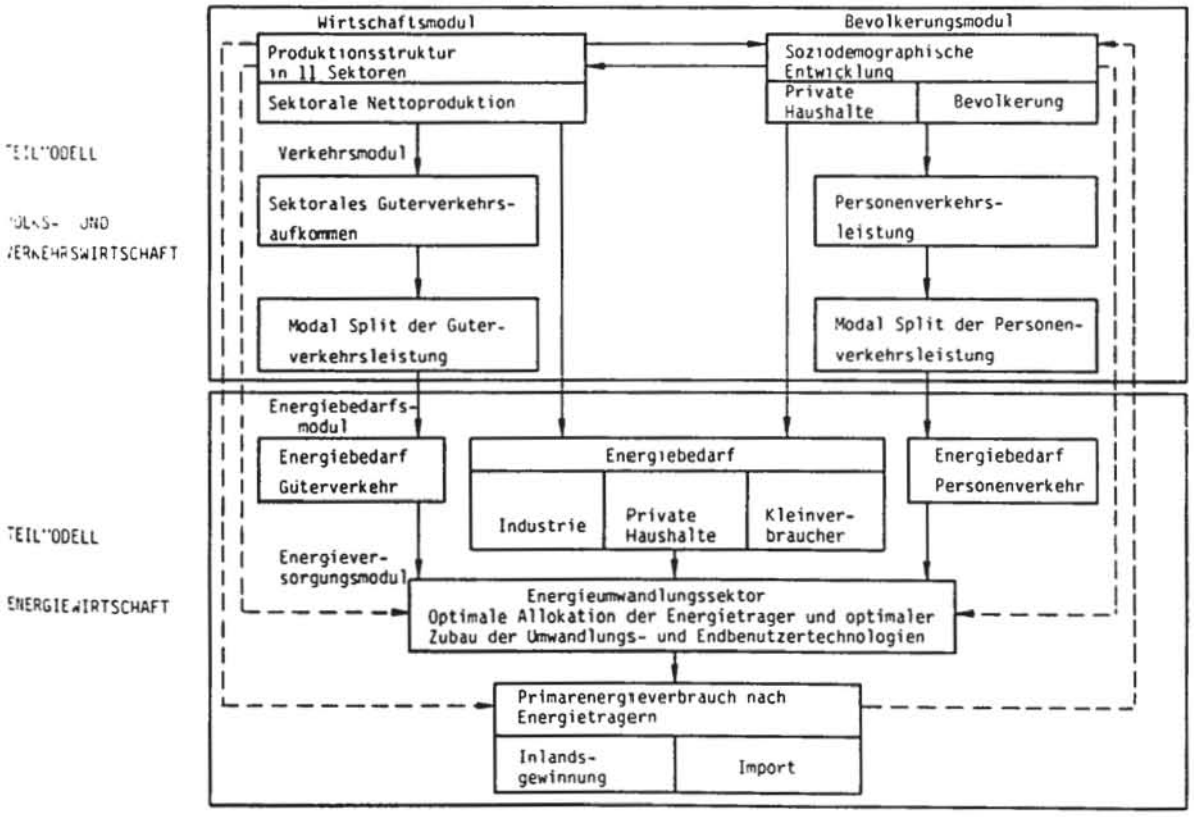

Abb. 1 Schematischer Aufbau des Modellsystems

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 integriert über den 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 Preisentwicklung der Primärenergieträger und eine Vielzahl von technischen und energiewirtschaftlichen Randbedingungen berücksichtigt. In der *Abbildung 2* ist exemplarisch für den Detaillierungsgrad des Modells, die Struktur des Raffineriesektors dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung des Modells findet sich in [1, 3]. Obwohl das verwendete Modellsystem eine Fülle von Gleichungen, Daten und Informationen enthält, ist es im Grunde nur ein schneller Rechenschieber, der Konsistenz sicherstellt und die rasche Ermittlung der Konsequenzen unterschiedlicher Annahmen und Hypothesen z.B. bezüglich der Energiepreisentwicklung oder der Kostenrelation zwischen verschiedenen Pkw-Antriebssystemen erlaubt.

Genau in diesem Sinne wurde das Modellsystem im Rahmen der Untersuchung eingesetzt, um alternative Szenarien der Entwicklung des Systems „Wirtschaft – Energie – Verkehr" quantitativ auszufüllen und im Rahmen von Sensitivitätsrechnungen die Auswirkungen veränderter Annahmen zu ermitteln.

Um im Rahmen der Analysen 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 Zukunftsentwicklungen für die wesentlichen den Verkehrssektor beeinflussenden Faktoren umreißen. Darüberhinaus wurden eine Reihe von Sensitivitäts- und Variationsrechnungen durchgeführt. Die wesentlichen die drei Szenarien charakterisierenden Rahmenannahmen sind in der *Tabelle 1* aufgeführt.

Das Referenzszenario ist durch die Fortsetzung der heute erkennbaren ökonomischen und technologischen Trends charakterisiert. Die Wohnbevölkerung wird bis zum Jahre 2010 auf etwa 55 Mio. Menschen abnehmen. Es wird angenommen, daß sich neue Basisinnovationen, die Motor für einen dauerhaften und nachhaltigen Wirtschaftsaufschwung sein könnten, nicht durchsetzen, so daß bei in etwa gleichbleibender Wirtschaftsstruktur sich nur ein mittleres Wirtschaftswachstum von durchschnittlich 2,8%/a einstellt. Für die Verkehrspolitik wird davon ausgegangen, daß die weitere staatliche Förderung des öffentlichen Personenverkehrs dazu führen wird, daß sich der in der Vergangenheit vollzogene Trend zur Ausweitung des Individualverkehrs nicht weiter fortsetzen wird. Beim Güterverkehr wird sich die Ausweitung des Anteils des Straßengüterverkehrs, wenn auch verlangsamt, fortsetzen.

Das Prosperitätsszenario unterstellt, daß nach der Theorie der langen Konjunkturwellen ab etwa 1990 ein nachhaltiger wirtschaftlicher Aufschwung einsetzt, der seine Ursache im Wirksamwerden neuer Basisinnovationen wie z.B. der Mikroelektronik hat. Das sich einstellende hohe Wirtschaftswachstum erlaubt dabei gleichzeitig eine erhebliche Minderung des Arbeitslosenproblems. Die Wohnbevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland wird aufgrund einer stärkeren Zuwanderung aus dem Ausland um etwa 7% bis zum Jahre 2010 abnehmen. Die Verkehrspolitik verzichtet 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 erweitern.

Das Restriktionsszenario ist durch einen Wandel der gesellschaftlichen Grundvorstellungen und der ökonomischen Verhaltensweisen in Richtung auf eine „tertiäre Zivilisation"

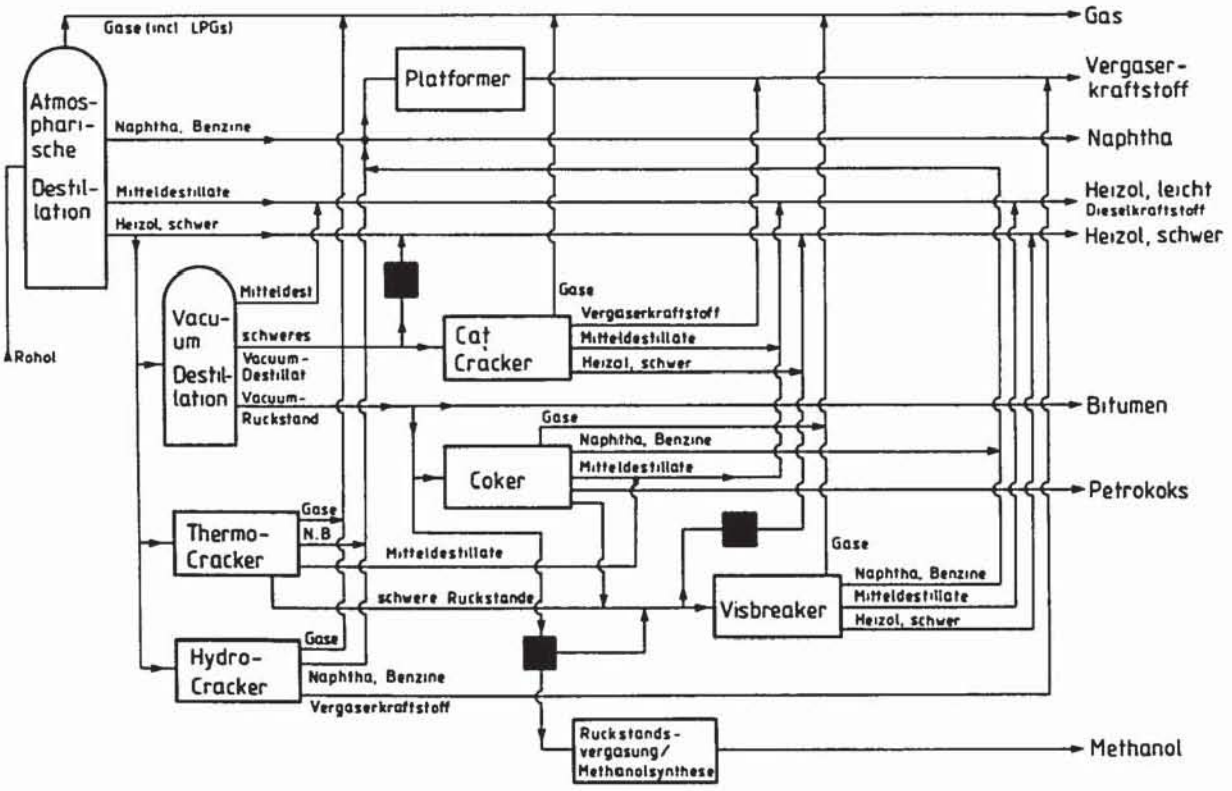

Abb. 2 Blockschaltbild des Raffineriesektors

Tabelle 1 Rahmenbedingungen der drei Szenarien

	Referenzszenario	Prosperitätsszenario	Restriktionsszenario
Grundtendenz	Fortschreibung der gegenwärtig erkennbaren ökonomischen und technologischen Tendenzen	Wirtschaftlicher Aufschwung ab etwa 1990 nach der Theorie der langen Konjunkturwellen	Wandel der gesellschaftlichen Grundvorstellungen und der ökonomischen Verhaltensweisen in Richtung „tertiäre Zivilisation"
Bevölkerung	Abnahme um etwa 10 % auf 55,1 Mio. bis 2010	Abnahme um 7 % bis 2010 auf 56,8 Mio.	Abnahme bis 2010 auf 56,4 Mio.
Wirtschaftswachstum	Mittleres Wirtschaftswachstum, ϕ 2,8 %/a	Hohes Wirtschaftswachstum, ϕ 3,7 %/a	Niedriges, stark degressives Wachstum, ϕ 2,2 %/a
Wirtschaftsstruktur	In etwa gleichbleibend	Ausweitung des sekundären Bereichs	Ausweitung des tertiären Bereichs
Personenverkehr	Förderung des ÖPV (wie bisher)	ÖPV und IV in Konkurrenz	starke Umschichtung zugunsten des ÖPV
Güterverkehr	Ausweitung des Straßengüterverkehrsanteils	Ausweitung des Straßengüterverkehrsanteils	Strukturelle Verschiebungen zugunsten von Schiene u. Binnenschifffahrt

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 diese 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.

Staatliche Eingriffe werden infolge gesellschaftspolitischer Forderungen auch in der Verkehrspolitik zunehmen. 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 Binnenschiffahrt. Das Automobil verliert in diesem Szenario seine Eigenschaft als Prestigeobjekt. Ein ausgeprägtes Kosten- und Umweltbewußtsein führt zur stärkeren Bevorzugung von Automobilen kleinerer und mittlerer Größe.

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 alternativ denkbare Zukünfte und die Unsicherheit bezüglich wichtiger Bestimmungsfaktoren für den Verkehrssektor umreißen, sollen auch die den Szenarien zugeordneten Energiepreisannahmen das Spektrum denkbarer Energiepreisentwicklungen einfangen und damit der Unsicherheit Rechnung tragen, die heute in bezug auf die Energiepreisentwicklung herrscht. Die den Rechnungen zugrunde liegenden Entwicklungen der Öl- und Importkohlepreise sind in der *Abbildung 3* 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 Nachfrageüberhängen bis zum Jahre 2000 eine Verdreifachung im Referenzfall, bzw. eine knappe Vervierfachung der Rohölpreise im Prosperitätsfall gegenüber Ende 1980 ein. 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 langsameres Anwachsen des Ölpreises unterstellt, der sich in diesem Fall bis zum Jahr 2010 nur um etwas mehr als 50% erhöht. In einer weiteren Variationsrechnung

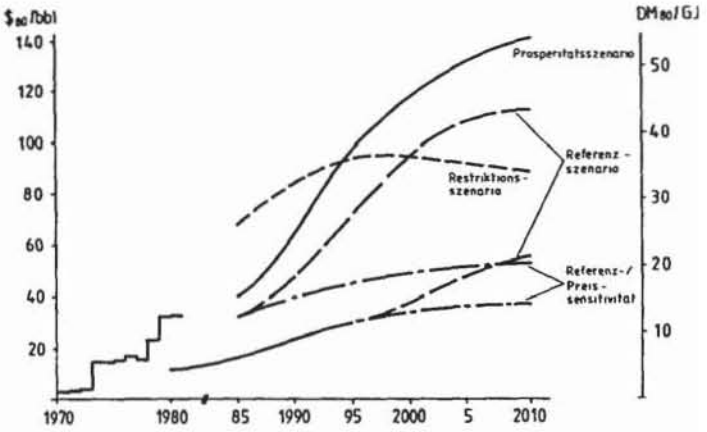

Abb. 3 Entwicklung der Rohölpreise

werden die Ölpreise, ebenso wie die anderen Energiepreise, auf dem Niveau von 1980 konstant gehalten.
In allen 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, wie dies exemplarisch für das Referenzszenario in der *Abbildung 3* dargestellt ist. 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 zum Öl und erreicht langfristig ca. 70% Ölparität.
Die Preisbildung für Erdgas auf den internationalen Märkten erfolgte in der Vergangenheit in starker Anlehnung an die Preise des Mineralöls oder gewisser Mineralölprodukte. In den Szenarien wird davon ausgegangen, daß dies auch in Zukunft der Fall sein wird.
In Bezug auf die Nutzung der Kernernergie wird unterstellt, daß im Restriktionsszenario der Ausbau der Kernenergie auf die heute im Bau und Betrieb befindlichen Kapazitäten begrenzt bleibt. Im Referenzszenario ist ein begrenzter Ausbau der Kernenergie möglich; allerdings kommen fortgeschrittene Reaktorkonzepte wie der Schnelle Brüter oder der Hochtemperaturreaktor nicht zum Einsatz. Im Prosperitätsszenario erfolgt der Ausbau der Kernenergie im wesentlichen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten.
In die Modellrechnungen sind noch eine Vielzahl weiterer Annahmen und Daten eingeflossen, auf die hier nicht explizit eingegangen werden kann. Es sei nur noch einmal ins Gedächtnis zurückgerufen, daß die zuvor erläuterten, die verschiedenen Szenarien und Sensitivitätsberechnungen charakterisierenden Annahmen, z.B. bezüglich der wirtschaftlichen oder Energiepreisentwicklung, nicht als Prognose mißverstanden werden dürfen, sondern als ein Spektrum denkbarer Entwicklungsmöglichkeiten, die aufgrund der bestehenden Unsicherheiten und Unwägbarkeiten heute nicht genau vorhersehbar sind.

3 Perspektiven der Energieverbrauchsentwicklung

Die im folgenden gegebene Darstellung der Ergebnisse der Modelluntersuchung beschränkt sich auf die energiewirtschaftlichen Aspekte. Zunächst werden die Entwicklungen bezüglich des Primärenergieverbrauchs erläutert; anschließend wird die Energienachfrageentwicklung in der Industrie sowie in den Haushalten und bei den Kleinverbrauchern diskutiert. Daran schließt sich eine etwas ausführlichere Darstellung der Perspektiven der Energieversorgung des Verkehrs sowie des Strukturwandels im Umwandlungsbereich an, wobei es insbesondere auf die Darstellung der wechselseitigen Verflechtungen ankommt.
Die Entwicklung des Primärenergieträgerverbrauchs in unserem Land bis zum Jahre 1973 war zum einen durch eine nur vereinzelt unterbrochene Zunahme des Verbrauchs auf 378,5 Mio t SKE und zum anderen durch das Vordringen des Mineralöls, das im Jahr der ersten Ölpreiskrise einen Versorgungsanteil von mehr als 55% hatte, gekennzeichnet. Seit 1980 ist der Primärenergieverbrauch rückläufig, im vergangenen Jahr betrug er 362,5 Mio t SKE und lag damit um 4% unter dem Verbrauch des Jahres 1973. Neben diesem Verbrauchsrückgang, auf dessen Ursachen hier im einzelnen nicht eingegangen werden kann, ist seit 1973 auch der Versorgungsanteil des Mineralöls und damit auch der Mineralölverbrauch deutlich zurückgegangen. Wie aus der *Abbildung 4* ersichtlich wird, setzt sich diese Entwicklung in allen Szenarien fort. Der Mineralölverbrauch ist in allen Szenarien rückläufig, dennoch bleibt Mineralöl auch im ersten Jahrzehnt des nächsten Jahrhunderts noch ein wichtiger Energieträger, seine gegenwärtige Vorrangstellung muß es allerdings an die Kohle und/oder Kernenergie abgeben. 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 gegenüber den anderen Szenarien geringere Rückgang des Mineralölverbrauchs geht dabei, wie aus der *Abbildung 4* ersichtlich, zu Lasten der Steinkohle. Entsprechend der szenariospezifischen Annahme, den Kernkraftwerksausbau auf die heute in Bau und Betrieb befindliche Kapazität 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 durch keine politischen Hemmnisse beschränkt wird, erreicht die Kernenergie im Jahre 2010 einen Versorgungsanteil von 36%. Das Erdgas behauptet in allen Rechnungen seine Marktposition, nur im Szenario Prosperität wird es nach 2000 aufgrund seines hohen Preises durch kostengünstigeres SNG aus Kohle teilweise verdrängt. Der Beitrag der „Sonstigen"-Energieträger, worunter auch die Sonnen- und Umgebungsenergie subsumiert sind, nimmt zwar in allen Szenarien zu, steigt aber selbst nach 2000 nicht über 5% an. Die Entwicklungen des gesamten Primärenergieverbrauchs, welche von einer Stagnation im Restriktionsszenario bis zu einer Zunahme um etwa 50% im Prosperitätsszenario reichen, spiegeln deutlich die unterschiedlichen Basisannahmen der Szenarien insbesondere bezüglich der wirtschaftlichen Entwicklung wider. Die Gesamtentwicklung des Primärenergieverbrauchs sowie die strukturellen Verschiebungen zwischen den einzelnen Primärenergieträgern resultieren aus sektorspezifischen Entwicklungen, auf die nun näher eingegangen werden soll.
Die privaten Haushalte, aber auch die Kleinverbraucher setzen den überwiegenden Teil der Energie für die Dekkung des Raumwärmebedarfs ein. Die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs in diesen beiden Bereichen ist in allen Szenarien durch die Realisierung weitreichender Maßnahmen zur Energieeinsparung gekennzeichnet, die ihren wesentlichen Impuls durch die steigenden Energiepreise erhalten (siehe *Abbildung 5*).
Die privaten Haushalte gleichen den Energiemehrverbrauch, der von größeren Wohnflächen und höheren Komfortansprüchen ausgeht, durch langfristig effizientere Heizungssy-

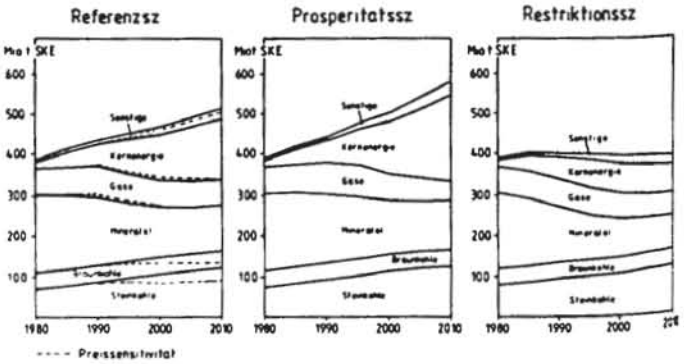

Abb. 4 Entwicklung des Primärenergieverbrauchs

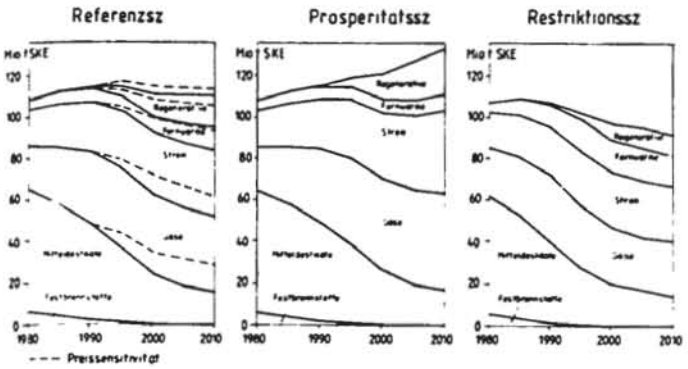

Abb. 5 Energienachfrage des Sektors Haushalte und Kleinverbrauch

steme und bessere Wärmedämmung mehr als aus. Einer maximalen Steigerung der Gesamtwohnfläche von 28% stehen drastische Energieeinsparungen bei der Raumheizung bis zu 40% im 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. Auffallendestes 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 im folgenden noch ausführlich erläutert wird, 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 leichte Teil des Rohöl-Barrels in der nichtenergetischen Verwendung seinen wichtigsten Markt findet, wird der Rückzug des leichten Heizöls aus dem Sektor der Haushalte und Kleinverbraucher erleichert.

Gas ist einer der Energieträger, der wesentlich zur Substitution des leichten Heizöls in diesem Sektor beiträgt. Der Gaseinsatz weitet sich im Referenz- und Prosperitätsszenario erheblich aus.

Die unterschiedliche Entwicklung des Stromverbrauchs nach 1990 resultiert im wesentlichen aus dem im Referenz- und Prosperitätsszenario deutlich höheren Einsatz von Strom zur Raumwärmebereitstellung mittels Nachtspeicher- und Wärmepumpenheizung als im Restriktionsszenario, wo eine verstärkte Stromnutzung auch durch den begrenzten Ausbau der Kernenergie behindert wird.

Der frühzeitige und steile Anstieg der Preise für die Importenergien Mineralöl und Erdgas führt im Restriktionsszenario zu einem forcierten Ausbau der Fernwärme bis zur Mitte der 90er Jahre.

Der insbesondere im Prosperitätsszenario hohe Beitrag regenerativer Energiequellen, der hier nach dem Substitutionsprinzip bewertet wurde, rührt her von einem hohen Anteil von Verbrennungsmotor- und Elektrowärmepumpen an der Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs. Wegen des hohen Energiepreisniveaus ist hier der Einsatz dieser effizienteren aber mit hohen Investitionskosten behafteten Techniken besonders attraktiv.

Der Endenergieverbrauch der Industrie wird im wesentlichen bestimmt von der Art und Menge der produzierten Güter und dem spezifischen Energieverbrauch pro Produktionseinheit. Das Streben nach rationeller Energienutzung war in der Industrie, insbesondere in den energieintensiven Bereichen schon immer ausgeprägt, so daß der spezifische Energieverbrauch in der Vergangenheit stetig abnahm. Bei den steigenden Energiepreisen setzt sich auch diese Entwicklung in den Szenariorechnungen fort. Dennoch wächst der Endenergieeinsatz der Industrie in allen Szenarien weiter an, und zwar von 88 Mio t SKE im Jahre 1980 auf 94 bis 130 Mio t SKE im Jahre 2010. Alle Rechnungen weisen wegen der deutlichen Preissteigerungen für Importenergien starke Veränderungen der Energieträgerstruktur aus. Der Einsatz von Mineralölprodukten ist stark rückläufig, während der direkte Einsatz von Kohle erheblich zunimmt. Der Stromeinsatz weitet sich insbesondere in den Szenarien aus, in denen der Einsatz der Kernenergie nicht begrenzt ist. 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 anderen Bereichen kompensiert werden.

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

4 Neue Kraftstoffe vor dem Durchbruch?

Vom Endenergieverbrauch des Verkehrs im Jahre 1981 in Höhe von 54,9 Mio. t SKE entfielen 47,5 Mio. SKE auf den Straßenverkehr und hiervon wieder rund 80% auf den Personenindividualverkehr mittels Pkw. Den Entwicklungen im Straßenverkehr und insbesondere im Pkw-Bereich kommen somit besondere Bedeutung für den gesamten Verkehrssektor zu. Ihnen wurde deshalb im Rahmen dieser Untersuchung besondere Aufmerksamkeit geschenkt. So wird bei den Pkw zwischen vier Fahrzeugkategorien, nämlich einer Unterklasse, der Mittelklasse, der Oberklasse und einer Stadtwagenklasse mit einer jährlichen Fahrleistung von nur 6000 km differenziert. 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 typische Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebssystemen und Kraftstoffen betrachtet, sie sind in der *Tabelle 2* aufgelistet.

Tabelle 2 Betrachtete Pkw-Antriebssysteme und Kraftstoffe

Antriebssystem	Kraftstoff
Ottomotor	Benzin
	M 3
	M 15
	M 100
	E 15
	E 100
	LPG
	CNG
	Wasserstoff
Dieselmotor	Diesel
Turbo-Dieselmotor	Diesel
Elektroantrieb (Batterie)	Strom

Tabelle 3 Entwicklungen der Verkehrsleistungen

			1980	2000	2010
Personenverkehrsleistungen	Mrd. P km/a	I	652,1	760,0	771,4
		II		895,2	918,3
		III		673,1	668,3
Individualverkehrsleistungen	Mrd. P km/a	I	531,6	632,7	642,2
		II		770,4	796,6
		III		511,1	501,2
Güterverkehrsleistungen	Mrd. t km/a	I	241,8	333,1	385,6
		II		360,7	463,5
		III		313,6	347,8
Straßengüterverkehrsleistungen	Mrd. t km/a	I	111,8	167,5	198,8
		II		184,5	244,0
		III		150,4	166,1

I: Referenzszenario; II: Prosperitätsszenario; III: Restriktionsszenario

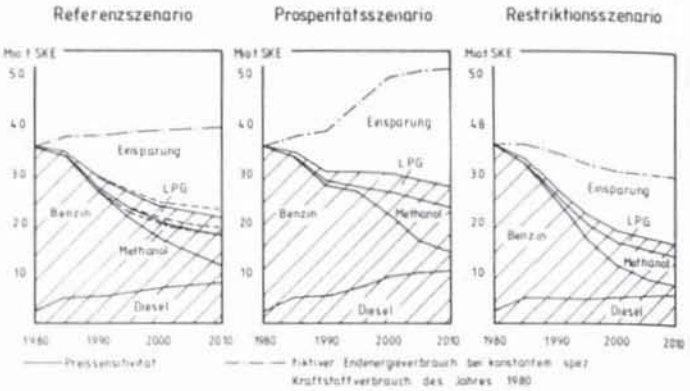

Abb. 6 Endenergieverbrauch der PKW

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. Für die Rechnungen wird unterstellt, daß alle Alternativkraftstoffe auf der Basis ihres Energieinhaltes wie Benzin besteuert werden. Für Dieselkraftstoff und LPG wird die Beibehaltung der gegenwärtigen Steuersätze angenommen. Natürlich ist es möglich, die Besteuerung im Rahmen der Modellrechnung als eine strategische Variable zu behandeln, um so die Auswirkungen alternativer Besteuerungsstrategien aufzuzeigen.

In Bezug auf die Entwicklung der Personen- und Güterverkehrsleistungen ergeben sich in den Szenarien deutliche Unterschiede (siehe *Tabelle 3*), die ihre wesentlichen Ursachen in den unterschiedlichsten Rahmendaten der Szenarien haben. So z.B. nimmt die Individualverkehrsleistung im Prosperitätsszenario um rd. 50% zu, während sie im Szenario Restriktion zurückgeht. Ähnlich szenariospezifische Entwicklungsunterschiede ergeben sich auch beim Straßengüterverkehr, obwohl die Straßengüterverkehrsleistung in allen Szenarien ansteigt.

Die für den Energieverbrauch im Pkw-Bereich wesentlichen Entwicklungstendenzen zeigt die *Abbildung 6*. In allen Szenarien geht die Energienachfrage des Personenindividualverkehrs drastisch zurück. Dies ist Resultat der Realisierung weitreichender Maßnahmen zur Reduzierung der spezifischen Kraftstoffverbräuche. Hierdurch fällt, wie aus der *Abbildung 6* ersichtlich ist, der Energieverbrauch gegen Ende des Betrachtungszeitraumes um durchschnittlich 46% geringer aus, als wenn die heutigen spezifischen Kraftstoffverbräuche unverändert blieben. 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.

Anders als beim Benzin nimmt beim Mitteldestillat der Trend zur motorischen Verwendung zu. Alle Rechenergebnisse bestätigen, daß der mit Dieselkraftstoff betriebene Pkw vorhandene Marktpotentiale weitestgehend ausschöpfen wird. Neben Vorteilen in der Besteuerung ist dies auch auf den günstigen Wirkungsgrad zurückzuführen. Die höheren Anschaffungskosten des Diesel-Pkw konkurrieren im energiewirtschaftlichen Gesamtzusammenhang mit den hohen Investitionsnotwendigkeiten einer etwaigen Konversion schwerer Mineralölprodukte in Benzin und den zusätzlichen Energieverlusten bei dieser Umwandlung. Mit steigenden Energiepreisen entwickelt sich diese Wettbewerbsbeziehung weiter zugunsten des Dieselantriebs. Der Dieselanteil am Kraftstoffverbrauch steigt bis zum Jahr 2000 auf ca. 30% und bis 2010 auf ca. 40% an.

In allen drei Szenarien und auch in der Preissensitivität zum Referenzszenario kommt LPG als alternativer Kraftstoff zum Einsatz, wobei der Marktanteil durch die verfügbaren LPG-Mengen begrenzt wird. Gestützt wird diese Entwicklung dadurch, daß in der zweiten Hälfte der 80er Jahre auch LPG-optimierte Fahrzeuge am Markt angeboten werden, die einen knapp 10% besseren Wirkungsgrad als benzingetriebene Fahrzeuge aufweisen. Daneben spielen die energiepolitischen Rahmenbedingungen, die den Einsatz von LPG z.B. durch Besteuerungsvorteile begünstigen, und eine vergleichsweise geringe Umweltbelastung eine wichtige Rolle.

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 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. Bei den relativ moderaten Ölpreissteigerungen der Preissensitivität zum Referenzszenario erweist sich eine inländische Methanolproduktion aus Kohle als nicht wirtschaftlich, so daß hier der Methanolbeitrag klein bleibt. Trotz dieser Unsicherheit zeigen die Modellrechnungen, daß Methanol der aussichtsreichste, nicht ölgebundene Alternativkraftstoff ist. Ihm

kommt damit eine besondere Bedeutung für die Reduzierung der Ölabhängigkeit des Verkehrssektors zu. Vor diesem Hintergrund erscheint es durchaus überlegenswert, ob nicht eine politische Absicherung der wirtschaftlichen Risiken einer heimischen Methanolproduktion energiepolitisch wünschenswert und sinnvoll ist.

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.

Die sich in den Szenariorechnungen abzeichnenden Veränderungen bezüglich der im Pkw-Bereich eingesetzten Kraftstoffe müssen natürlich einhergehen mit einer entsprechenden Veränderung der Zusammensetzung der Pkw-Bestände. Der langfristig sich einstellende Pkw-Gesamtbestand schwankt in den einzelnen Szenarien zwischen 24 Mio und 28 Mio Fahrzeugen. In der *Abbildung 7* ist der typische Verlauf der Bestandsveränderung für das Prosperitätsszenario dargestellt. 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 deutlich gestiegenes Verbraucherinteresse an dieselgetriebenen Fahrzeugen zu verzeichnen, was dazu führte, daß der Dieselanteil bei den Neuzulassungen zeitweise 20% betrug. Die Modellrechnungen zeigen in allen Szenarien eine Fortsetzung dieses Trends. Der Bestand an Dieselfahrzeugen überschreitet bereits 1990 die 4 Mio Marke, und bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes steigt der Diesel-Pkw-Anteil auf ca. 35% an, so daß etwa noch zwei Drittel des Fahrzeugbestandes mit Ottomotoren bestückt sind.

Bei den Kraftstoffen für die ottomotorbetriebenen Pkw ergeben sich gravierende Strukturverschiebungen, die durch das Zurückdrängen des mit Rein-Benzin betriebenen Pkw's und eine Ausweitung der LPG-getriebenen Fahrzeuge gekennzeichnet sind.

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 gegen Ende des Betrachtungszeitraumes Bestandszahlen, die je nach Szenario zwischen 7,5 und 10 Mio Fahrzeugen liegen.

Unter den Energiepreisannahmen der Preissensitivität zum Referenzszenario erweist sich die Einführung von Reinmethanolfahrzeugen als nicht wirtschaftlich. Die hier begrenzten, ausschließlich aus Importen zur Verfügung stehenden Methanolmengen werden als Mischkraftstoff eingesetzt, unter anderem deshalb, weil für M15-Fahrzeuge kaum Zusatzkosten zu Buche schlagen.

Wie bereits erwähnt, haben die Entwicklungen im Pkw-Sektor natürlich wesentlichen Einfluß auf die Energieträgernachfragestruktur des gesamten Verkehrssektors. In der *Abbildung 8* ist für die verschiedenen Szenarien die Endenergieträgernachfrage-Entwicklung des Sektors Verkehr dargestellt, wobei in den Zahlenangaben auch die Bunkerungen

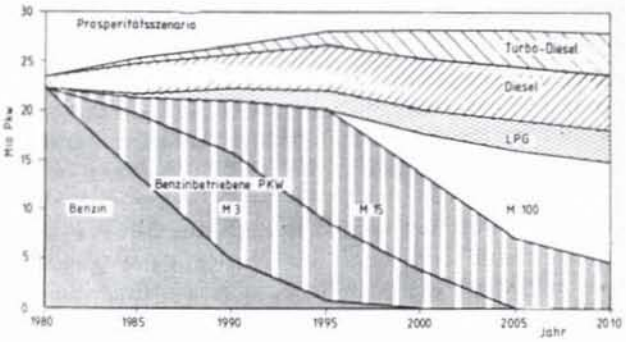

Abb. 7 Strukturänderung im PKW-Bestand

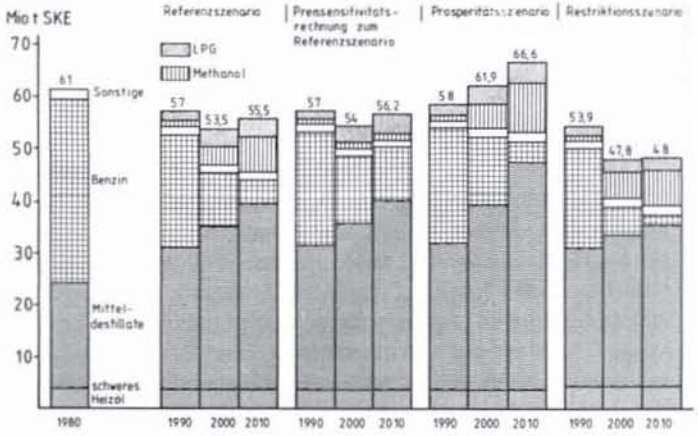

Abb. 8 Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr

der Hochseeschiffahrt enthalten sind. Alle Modellrechnungen zeigen eine deutliche Entkopplung zwischen der Entwicklung der Verkehrsleistung und der Endenergienachfrage. Im Referenzszenario geht der Endenergieverbrauch bereits Mitte der neunziger Jahre auf etwas 55 Mio t 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 geringen Verkehrsleistungen mit 48 Mio t SKE im Jahre 2010 noch niedriger. Allein im Prosperitätsszenario kann die Verbesserung der spezifischen Energieverbräuche die mit wachsender Verkehrsleistung zunehmende Energienachfrage nicht kompensieren, so daß hier bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes der Endenergieverbrauch um ca. 10 % anwächst.

Die Entwicklung der Endenergieträgerstruktur im Verkehrsbereich ist durch zwei robuste Trends gekennzeichnet. Der eine ist die starke Ausweitung des Einsatzes von Mitteldestillaten – hierunter ist auch der Kerosineinsatz im Luftverkehr erfaßt –, und der andere ist der starke Rückgang des Einsatzes von Raffineriebenzin. Die Mitteldestillate dehnen ihren Versorgungsanteil von heute einem Drittel auf zukünftig zwei Drittel aus, während der Benzineinsatz in den drei Szenarien von heute 35 Mio t SKE auf 1,6 bis 4 Mio t SKE im Jahre 2010 zurückgeht. Die bei der Preissensitivität zum Referenzszenario zugrundegelegten moderaten Ölpreissteigerungen bewirken eine zwar langsamere, aber dennoch beachtliche Benzinsubstitution, die sich auch in einer weiteren Sensitivitätsrechnung einstellte, in der die Ölpreise auf dem heutigen Niveau konstant gehalten wurden. Wie bereits erwähnt, hat die Benzinsubstitution ihre Ursachen in dem im Vergleich zu anderen Kraftstoffen ungünstigeren Motornutzungsgrad. Weitere Nachteile zum LPG 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.

Trotz der in den Szenarien unterstellten drastischen Ölpreissteigerungen bleibt der Verkehrssektor auch weiterhin vom Mineralöl abhängig. In den Szenarien geht der Mineralölproduktanteil zwar zurück, mit über 80 % bleibt er aber weiterhin dominant.

Das Methanol ist bei einer sich ausweitenden Preisschere zwischen Rohöl und Kohle die einzige Versorgungsalternative mit wirtschaftlicher Bedeutung. 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 Umwandlungskosten ebenso wenig zum Tragen wie die Benzinsynthese aus Methanol über den Mobilprozeß.

5 Umwandlungsbereich

Die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Entwicklungstendenzen in den energienachfragenden Sektoren Haushalte und Kleinverbrauch, Industrie und Verkehr sind natürlich nicht losgelöst von den Entwicklungen im Umwandlungsbereich, sondern beide beeinflussen sich wechselseitig. Ohne hier auf den gesamten Umwandlungsbereich detailliert eingehen zu können, soll im folgenden nur auf die Mineralölverarbeitung und kurz auf die Kohleveredlung eingegangen werden.

Die Entwicklungen im Raffineriebereich spiegeln zum einen den Rückgang des Ölverbrauches 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 *Tabelle 4)*; 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 Produktausbeute zur leichten Seite zu verschieben. Aufgrund der durchgeführten Modellrechnungen scheint ein Ausbau von Konversionsanlagen zur Umwandlung schwerer Mineralölprodukte zu Benzin langfristig keine energiewirtschaftlich 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 die *Tabelle 4* 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 Niveau an Konversionskapazitat 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.

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, aber auch von der Verfügbarkeit der Kernenergie ab.

Eine Veredlung von Kohle erfolgte nur in den Szenarien, in denen sich die Preisschere zwischen dem Öl- und Kohlepreis öffnet. Dabei erweisen sich die Methanol- und SNG-Erzeugung als die bevorzugten Umwandlungsrouten. Für die Veredlung von Kohle bleibt somit festzustellen, daß sie nur dann Marktchancen hat, wenn der Ölpreis erheblich ansteigt, was ja nicht ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 4 Entwicklung des Raffineriedurchsatzes und Konversionsausstoßes (Mio t OE)

	Anlagentyp	1980	1985	1990	1985	2000	1005	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	–	–	–

6 Zusammenfassung

Bevor die wesentlichen Ergebnisse der modellgestützten Untersuchung zusammengefaßt werden, sei ausdrücklich noch einmal daran erinnert, daß es nicht das Ziel der Analysen war, den vielen Prognosen über die Entwicklung der Energieversorung und des Verkehrssektors eine weitere hinzuzufügen. Es sollten vielmehr unter expliziter Berücksichtigung der vielfältigen Unsicherheiten alternative Entwicklungen des Verkehrssektors und seiner Versorgung mit Energie im Kontext der gesamtwirtschaftlichen und energiewirtschaftlichen Perspektiven systematisch untersucht werden, um robuste, d.h. von der unsicheren Entwicklung wichtiger Bestimmungsfaktoren unabhängige Entwicklungstrends zu identifizieren.

Es gibt sicher noch eine Reihe von Einzelaspekten, die einer weiteren detaillierten Analyse bedürfen, als sie im Rahmen der Untersuchung möglich war, dennoch lassen sich aus den Untersuchungsergebnissen die folgenden, robusten Schlußfolgerungen ziehen:

1. Die sparsamere und rationellere Energieverwendung bewirkt eine deutliche Entkopplung von Energieverbrauchs- und Wirtschaftswachstum.
2. Die Energieversorgungsstrukturen des Verkehrssektors werden sich in Zukunft durch die Realisierung von energiesparenden Maßnahmen sowie durch einen wachsenden Anteil von zum herkömmlichen Benzin alternativen Kraftstoffen gravierend verändern. Dieselkraftstoff wird zum wichtigsten Energieträger im Verkehrssektor, während der Benzinverbrauch merklich zurückgeht. Der starke Rückgang des Benzinabsatzes hat seine Ursachen in – gegenüber Diesel-, LPG- und Alkoholfahrzeugen – ungünstigeren Wirkungsgraden, dem hohen Kapital- und Energieeinsatz einer eventuellen Konversion im Raffineriebereich sowie in den steuerlichen Nachteilen gegenüber Diesel und LPG.
   Das Mineralöl bleibt dennoch über die Jahrhundertwende hinaus der dominierende Primärenergieträger für den Verkehr. Die einzige nicht ölgebundene Kraftstoffalternative mit Aussicht auf wirtschaftliche Bedeutung ist das Methanol.
3. In allen durchgeführten Szenariorechnungen ist der Mineralölverbrauch rückläufig. Damit ist eine teilweise erhebliche Reduzierung des Rohöleinsatzes in den Raffinerien. Ein weiterer Abbau von Destillationskapazität in der Zukunft erscheint unvermeidbar.
4. Alle Szenariorechnungen, die für ein breites Spektrum denkbarer Ölpreisentwicklungen durchgeführt wurden, zeigen, daß ein verstärkter Ausbau von Konversionsanlagen zur Erzeugung von Benzin aus schweren Mineralölprodukten energiewirtschaftlich nicht sinnvoll ist.
5. Marktchancen für eine wirtschaftliche Erzeugung von Methanol und Gas aus Kohle bestehen nur im Falle erheblicher Ölpreissteigerungen.

Literaturverzeichnis

[1] K. Bellmann, et al., Energie für den Verkehr, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., FAT-Schriftenreihe Nr. 25, Frankfurt 1983.

[2] Voß, A., Möglichkeiten und Grenzen von Energieprognosen, in: Existenzfrage: Energie, Düsseldorf 1980.

[3] Rath-Nagel, St.; Stocks, K, Energy Modelling for Technology Assessment: The MARKAL Approach, in: OMEGA, Vol. 10, No. 5, 1982, pp. 493 to 505.