

BERND GOLLING

Energieverbrauch und Möglichkeiten der Energieeinsparung im Verkehrssektor

1. *Notwendigkeit von Maßnahmen zur Energieeinsparung und -substitution im Verkehr*

Seit der Ende 1973 offen zutage getretenen Energiekrise, die auf eine Verknappung und Preiserhöhung des bedeutenden Primärenergieträgers „Rohöl“ zurückzuführen ist, zeigt sich in der Bundesrepublik Deutschland wie in anderen hochentwickelten Industrienationen, in welchem Maße die wirtschaftlichen Prozesse durch die Verfügbarkeit preisgünstiger Energieträger bestimmt werden (vgl. Abb. 1). Im Verbrauchssektor „Verkehr“, in dem bereits 95 % des Primärenergiebedarfs durch Mineralöl gedeckt werden (vgl. Abb. 2), hat sich überwiegend infolge eines starken Anstiegs des Individualverkehrs eine bedenkliche Abhängigkeit vom

Mineralöl manifestiert, die aufgrund mangelnder inländischer Vorkommen einen erhöhten Risikofaktor für die wirtschaftliche Entwicklung der Bundesrepublik darstellt.

Aber auch bei weiterhin ungestörter Rohölversorgung ist aufgrund begrenzter Lagerstätten auf der Erde langfristig eine kontinuierliche Umrüstung der vorhandenen Verkehrsmittel auf andere, nicht vom Primärenergieträger Rohöl abhängige Antriebssysteme unumgänglich. Verschiedenen Prognosen [1]* zufolge dürften die tatsächlich vorhandenen förderbaren Rohölreserven in der Welt bei 250 bis 260 Mrd. t liegen. „Einer solchen Vorratsmenge würde eine Produktionskurve

* Die Zahlen in [] beziehen sich auf die Literaturangaben am Schluß des Beitrages.

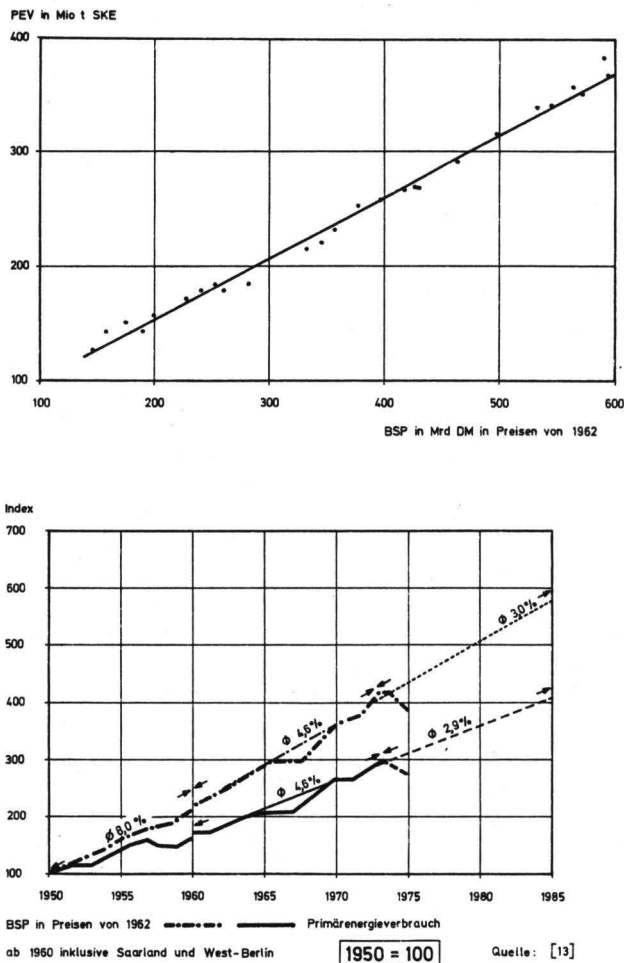


Abb. 1: Primärenergieverbrauch in Abhängigkeit vom Bruttoinlandsprodukt (1950–1975) (oben) sowie Bruttoinlandsprodukt und Primärenergieverbrauch (unten)

entsprechen, die um das Jahr 2000 ihre Spitze bei etwa 3,4 Mrd. t hätte und ein paar Jahrzehnte in das nächste Jahrhundert hineinreichte“, also in 40 bis 60 Jahren die praxisreife Anwendung neuer Antriebstechniken voraussetzt.

Da außerdem der Gesamtwirkungsgrad, mit dem die eingesetzte Primärenergie heute genutzt wird (vgl. Abb. 3), aufgrund mangelnder Ausnutzung und unwirtschaftlicher Einsatzbedingungen im Verkehr mit etwa 17 % besonders niedrig ist, besteht die vordringliche Aufgabe, kurz-, mittel- oder langfristige Maßnahmen zu ergreifen mit dem allgemeinen Ziel einer rationelleren Nutzung der im Verkehr eingesetzten Energiemengen.

Schließlich bewirken die sich insbesondere in Ballungsgebieten verschlechternden Verkehrsverhältnisse, unter anderem hervorgerufen durch wachsende Motorisierung und steigendes Mobilitätsbedürfnis der Bevölkerung, neben einer Erhöhung des Energiebedarfs auch eine zunehmende Verschlechterung der Umweltqualität, verursacht durch erhöhte Schadstoffproduktion der Verkehrsmittel. Daher bedeuten Maßnahmen, die auf einen energiesparsamen Einsatz von Verkehrsmitteln abzielen, im allgemeinen auch eine Verminderung der Umweltbelastung.

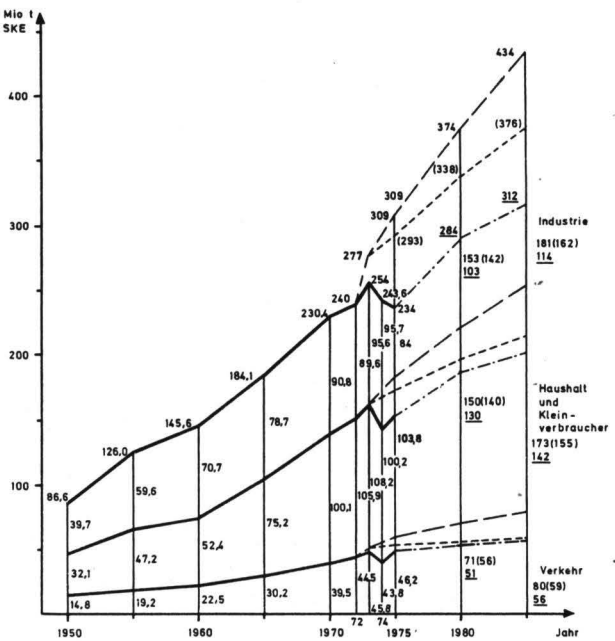


Abb. 2: Endenergieverbrauch in der BRD nach Wirtschaftssektoren

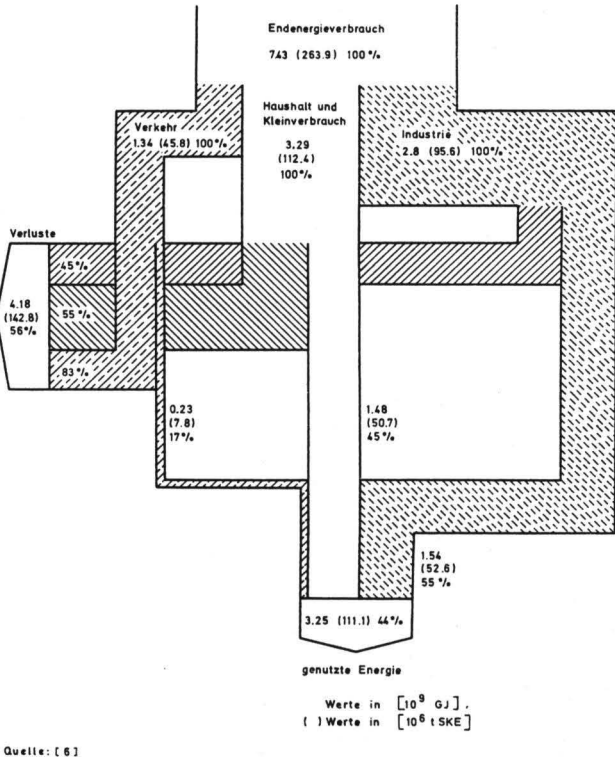


Abb. 3: Gesamtnutzungsgrad der 1973 in der BRD eingesetzten Endenergiemengen nach Wirtschaftssektoren

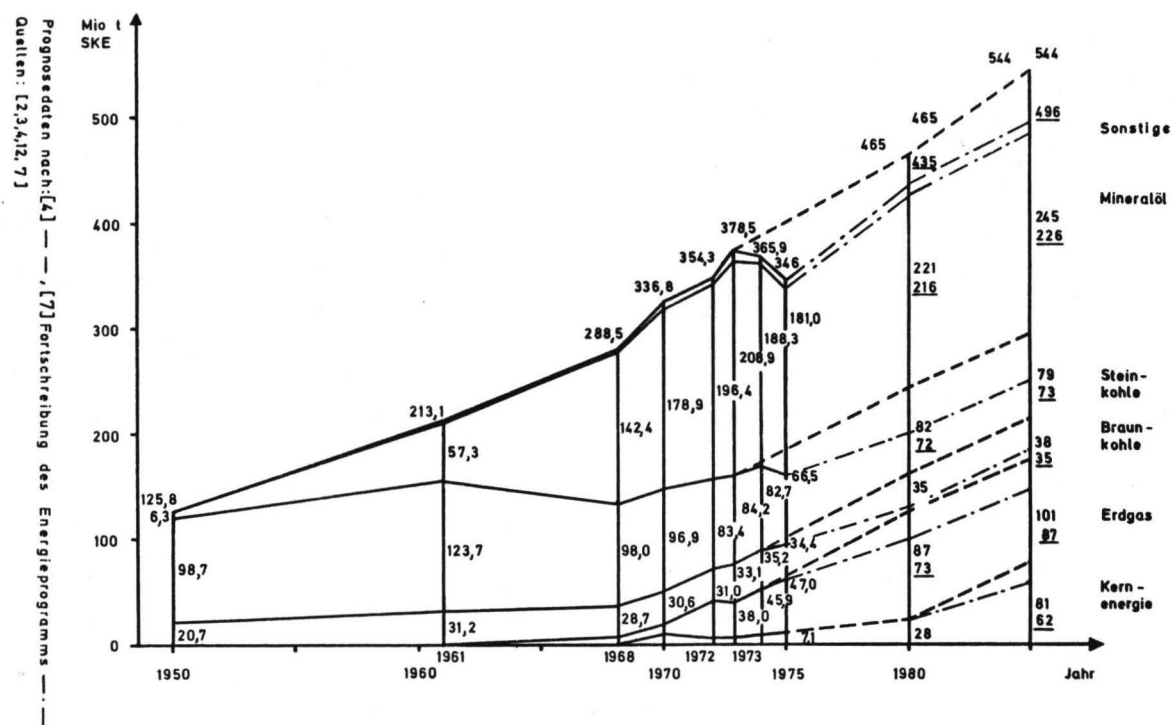


Abb. 4: Gesamtprimärenergieverbrauch in der BRD nach Energieträgern

2. Struktur des Energieverbrauchs im Verkehr der Bundesrepublik Deutschland

Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland seit 1950 wurde geprägt durch eine Verneunfachung des Mineralölverbrauchs in den Jahren von 1950 bis 1961 und eine nahezu Vervielfachung in den Jahren von 1961 bis 1973 (vgl. Abb. 4). Dieser enorme Anstieg des Mineralölverbrauchs findet seine Begründung im wesentlichen in der zunehmenden Substitution der Kohle in der Industrie und insbesondere bei den Haushalten und Klein-

verbrauchern sowie in einem gleichfalls außerordentlich starken Anstieg des Kfz-Bestandes um 273 % in den Jahren 1950 bis 1961 und um weitere 151 % von 1961 bis 1976. Parallel zu dieser Entwicklung fiel der Steinkohleverbrauch nach einer leichten Steigerung am Anfang der sechziger Jahre um etwa 25 % gegenüber 1950 im Jahre 1968 wieder auf das Verbrauchsniveau des Jahres 1950 zurück und erreichte 1975 mit 66,5 Mill. t Fördermenge seinen bisher tiefsten Stand. Der Braunkohleverbrauch dagegen stieg in den Jahren 1950 bis 1961 um etwa 51 %, blieb aber dann, abgesehen von einigen Schwankungen zwischen 28,7 Mill. t im Jahre 1968 und 35,2

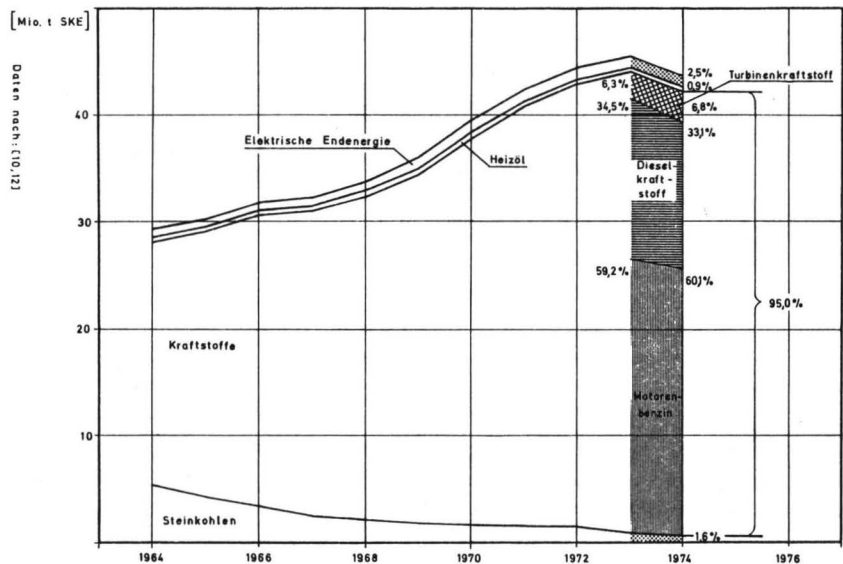


Abb. 5: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor der BRD nach Endenergieträgern

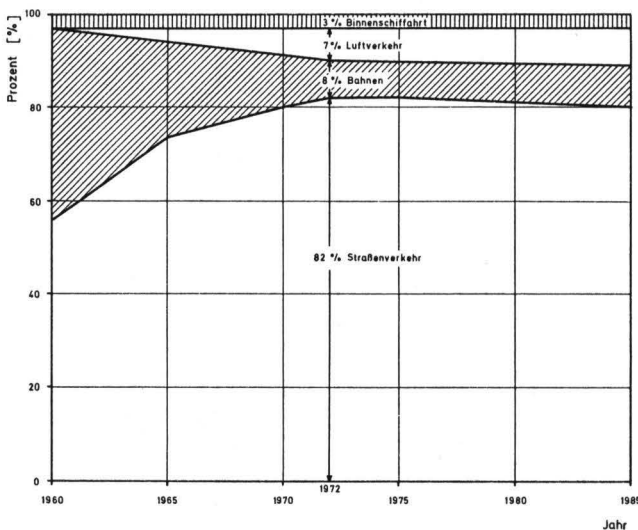


Abb. 6: Anteil der Verkehrsträger am Endenergieverbrauch des Verkehrs (ohne Hochseeschifffahrt und Schmieröle)

Quelle: [5]

Mill. t im Jahre 1973, relativ konstant. Eine beispiellose Entwicklung verzeichnete der Primärenergieträger Erdgas, dessen Verbrauch in der Bundesrepublik infolge umfassender Umrüstung in einigen Industriebereichen (zum Beispiel Glaswerke) und zahlreichen Haushalten auf Erdgasfeuerung von 2,3 Mill. t SKE im Jahre 1964 um 144 % auf 47,0 Mill. t SKE im Jahre 1975 gesteigert wurde und Prognosen [4] zufolge bis 1980 einen Anteil von etwa 19 % am Gesamtprimärenergiebedarf der Bundesrepublik Deutschland erreichen soll. Der Primärenergieträger Kernenergie, dessen Anteil am Gesamtprimärenergieverbrauch 7,1 % im Jahr 1975 betrug und bis 1985 auf 15 % gesteigert werden soll, trägt über die Produktion elektrischer Endenergie, deren Anteil am Endenergieverbrauch im Verkehr nur 2,5 % im Jahr 1974 betrug (vgl. Abb. 5), gegenwärtig lediglich zu einem verschwindend geringen Teil zur Deckung des Endenergieverbrauchs im Verkehr bei.

Der Verbrauchssektor Verkehr, auf den im Jahr 1974 18,0 % des gesamten Endenergieverbrauchs der Bundesrepublik entfielen (vgl. Abb. 2), ist gekennzeichnet durch den geradezu beunruhigend hohen Anteil der Mineralölprodukte Motorenbenzin, Dieselmotorenkraftstoff, Turbinenmotorenkraftstoff und Heizöl von insgesamt 95,9 % im Jahre 1974 am Endenergieverbrauch im Verkehr (vgl. Abb. 5). Unter dem Aspekt, daß die Bundesrepublik fast ausschließlich von Mineralöl i m p o r t e n abhängig ist, stellt sich daher die Aufgabe, Möglichkeiten eines stärkeren Einsatzes von Verkehrsmitteln, die mit elektrischer Endenergie betrieben werden, zu untersuchen, um diesen hohen Verbrauchsanteil der Mineralölprodukte zugunsten elektrischer Endenergie und damit längerfristig verfügbarer Primärenergieträger (Kohlen, Kernenergie) zu reduzieren. Die Einführung von Elektroantrieben im Straßenverkehr, der zur Zeit mit 82 % am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrs beteiligt ist (vgl. Abb. 6) und zu 100 % Mineralölprodukte benötigt, scheint hierbei die größte Effizienz aufzuweisen. Mit den momentan zur Verfügung stehenden Akkumulatoren geringer Energie-

dichte und Reichweite ist die breite Einführung des Elektroantriebs im Straßen-Personenverkehr jedoch außer im extremen Nahbereich zur Zeit noch nicht realisierbar.

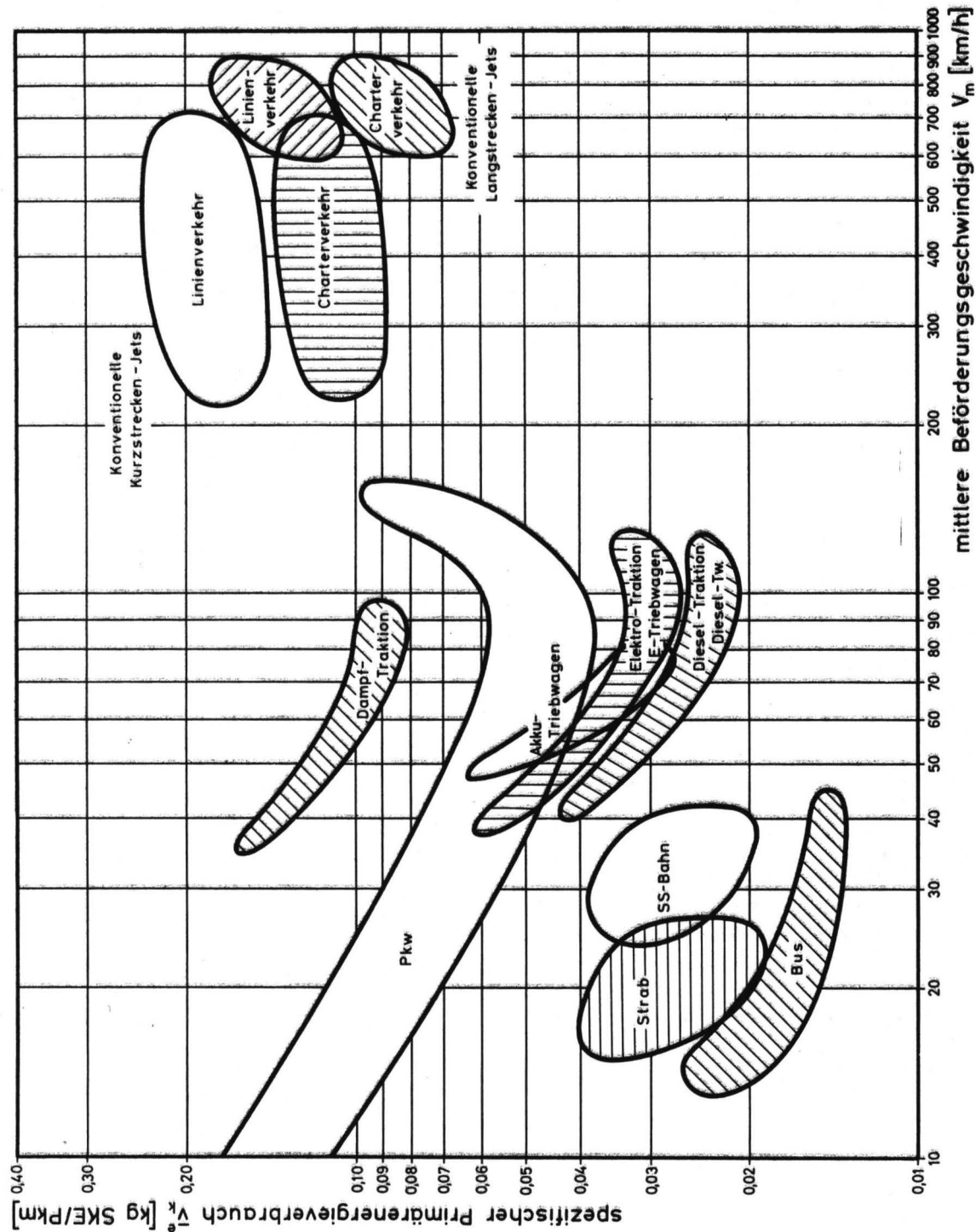
Aufgrund der Tatsache, daß die spezifischen, auf die Einheit der Verkehrsarbeit bezogenen Energieeinsätze bei den einzelnen Verkehrsmitteln auch bei gleicher Auslastung infolge unterschiedlicher Einsatzweisen und Bewegungswiderstände sehr differieren, stellt die Einstellung bzw. die Verlagerung energieaufwendiger Verkehrszweige auf energiesparendere Verkehrsmittel einen weiteren wesentlichen Beitrag zur Lösung der gesamten Problemstellung dar. So liegen die spezifischen Primärenergieverbräuche im Flugverkehr bei Auslastungen zwischen 55 und 80 % mit Werten zwischen 0,09 und 0,23 kg SKE/Pkm an der Spitze aller Verkehrsmittel des Personenverkehrs, wie Abb. 7 zeigt. Hier bietet sich eine Verlagerung von Teilen des Flugverkehrs auf die Schiene (IC-Züge, Schnellgüterzüge) an. Ebenso liegen die spezifischen Energieeinsätze des Pkw-Verkehrs (insbesondere im Berufsverkehr mit einer mittleren Besetzung von 1,4 Personen/Fzg) schon jetzt deutlich über denjenigen der Massenverkehrsmittel Bus, Stadtbahn und Eisenbahn, obwohl deren mittlere Besetzungsgrade von zur Zeit 18–36 % (vgl. Abb. 7) durch Maßnahmen mit dem Ziel der Verkehrsverlagerung noch zu steigern sind, was wiederum dazu beiträgt, den spezifischen Energieeinsatz dieser Verkehrsmittelgruppen weiter zu senken.

3. Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor

Theoretisch bieten sich in allen Einzelphasen der Energieflußkette (vgl. Abb. 8) von der Primärenergiegewinnung bis zum Verbrauch mechanischer Bewegungsenergie Möglichkeiten einer Verbesserung der Einzelwirkungsgrade an. Diese rationellere Nutzung der eingesetzten Energiemengen in den Einzelphasen trägt dazu bei, den Gesamtnutzungsgrad im Verkehr zu erhöhen und damit den Primärenergiebedarf zu vermindern.

Den Energieflußphasen entsprechend sind demnach folgende übergeordnete Ansatzpunkte für die Reduzierung des Energieverbrauchs eines Verkehrsmittels anzugeben:

- Gewinnung und Transport der Primärenergieträger,
- Umwandlung der Primär- in Sekundärenergieträger,
- Transport und Verteilung der Sekundärenergieträger von der Umwandlungsstelle zum Endverbraucher (Verkehrsmittel),
- Speicherung der Endenergie im Verkehrsmittel,
- Transportgefäß,
- Antriebsaggregat,
- Anlagen zur Kraftübertragung der mechanischen Bewegungsenergie,
- Nebenaggregate der Antriebe und des Transportgefäßes,
- Führungs- und Tragetechnik Verkehrsmittel/Verkehrsweg,
- Höhenprofil der Verkehrswege,
- Einsatzweisen und Betriebszustände des Verkehrsmittels.



Bahn: durchschnittliche Lasten und Besetzungsgrade (DB-Statistik)	Pkw: durchschnittliche Besetzung p_k nach GVP NRW 1971
Dampf-Traktion: 300 Lt $\alpha = 27\%$	$p_k \text{ max} = 2,30 \text{ Pers./Fahrz.}$ Urlaubs-, Erholungs-, Freizeitverkehr
E-Traktion: 350 Lt $\alpha = 36\%$	$p_k \text{ min} = 1,40 \text{ Pers./Fahrz.}$ Geschäfts- und Dienstreiseverkehr
Diesel-Traktion: 270 Lt $\alpha = 31\%$	Bus: mittlerer Besetzungsgrad $\alpha_k = 20\%$ (VÖV-Umfrage)
E-Triebwagen: 200 Lt $\alpha = 25\%$	Stadtschnell-Bahn: mittlerer Besetzungsgrad $\alpha_k = 18\%$ (VÖV-Umfrage)
Akku-Triebwagen: 80 Lt $\alpha = 30\%$	Straßenbahn: mittlerer Besetzungsgrad $\alpha_k = 21\%$ (VÖV-Umfrage)
Diesel-Triebwagen: 170 Lt $\alpha = 30\%$	Flugzeug: mittlerer Besetzungsgrad
	Linienverkehr $\alpha_k = 55\%$ (Lufthansa)
	Charterverkehr $\alpha_k = 80\%$

Anmerkung: Gültig für die erforderliche Bewegungsenergie der Transportelemente mit Berücksichtigung der Energieumwandlungs- und -verteilungsverluste

Abb. 7: Vergleich der realen spezifischen Primärenergieverbräuche im Personenerkehr der BRD im Bezugsjahr 1974
Quelle: [9]

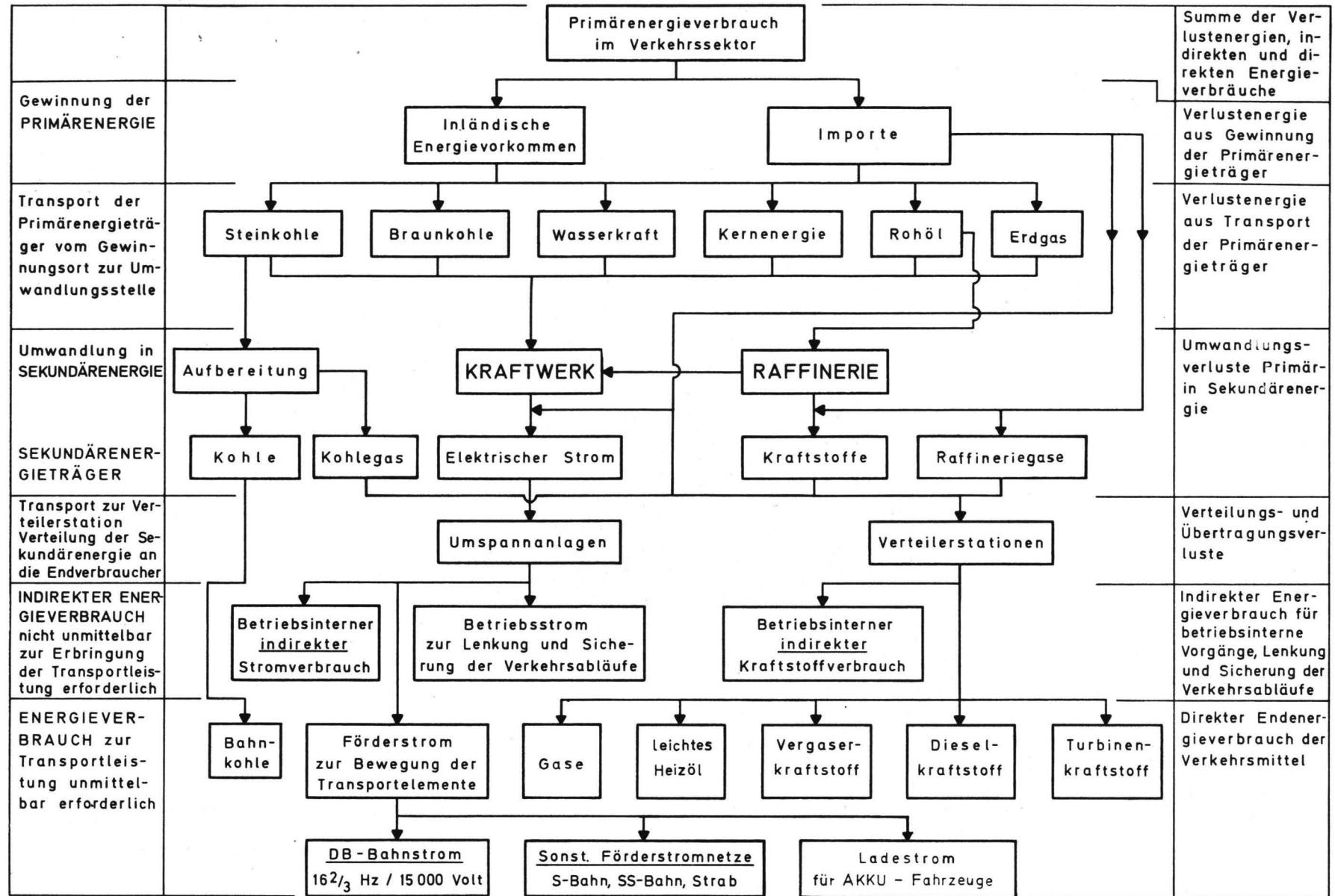


Abb. 8: Energieflußphasen im Verkehrssektor von der Primärenergiegewinnung zum Endenergieverbraucher

Außerdem sind die *n i c h t* unmittelbar für den Transportvorgang benötigten Energiemengen zur Regelung und Sicherung der Verkehrsabläufe (zum Beispiel für Ampeln, Signalsysteme, Beleuchtung, Streudienst) und für betriebsinterne, notwendige Leistungen der Verkehrsbetriebe (zum Beispiel Rangierfahrten bei der Zugbildung der DB) bei der Analyse von Möglichkeiten zur Energieeinsparung einzubeziehen.

Schließlich stellen neben den verkehrsmittel-, verkehrsweg- und verkehrsbetriebsspezifischen Einflußkomponenten auch die Bestimmungsfaktoren für die Erzeugung und Verteilung der nachgefragten Verkehrsleistungen [Pkm/tkm] und daraus resultierend für die *B e t r i e b s l e i s t u n g e n* [Fzg-km] der Transportmittel Ansatzpunkte zur Beeinflussung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor dar.

4. Systematik möglicher Energiesparmaßnahmen im Verkehrssektor

In den folgenden Tabellen wird ein Spektrum möglicher Energiesparmaßnahmen im Verkehrssektor am Beispiel des energierelevanten Personenverkehrs umrissen. Der überwiegende Teil dieser Maßnahmen ist dabei aufgrund jeweils gleicher physikalischer Bewegungscharakteristiken bei Schienenbahnen, Straßen-Nutzfahrzeugen und Flugzeugen auf den Güterverkehr übertragbar. Für die beiden übrigen Güterverkehrsmittelhauptgruppen Binnenschiff und Pipeline gelten die gleichen Maßnahmenprinzipien wie bei allen anderen Verkehrsmitteln:

- Erhöhung der Einzelwirkungsgrade in der Energieflußkette,
- Minimierung der Bewegungswiderstände,
- Einsatz mit Betriebsweisen hohen Wirkungsgrades,
- Erhöhung der verkehrsbetrieblichen Ausnutzung.

Die aufgeführte Systematik möglicher Energiesparmaßnahmen im Personenverkehr umfaßt neben bereits erwähnten technischen Maßnahmenkomplexen an Verkehrsmitteln und Energieversorgungseinrichtungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei der Bewegung *e i n e s* Transportelements folgende Einflußbereiche:

- Bauliche Maßnahmen an Verkehrswegen und -netzen,
- verkehrsbetriebliche Maßnahmen und energiesparende Verhaltens- und Betriebsweisen,
- verkehrs-, raumordnungs- und allgemeinpolitische Maßnahmen.

Die theoretisch mögliche Energieeinsparung aufgrund einer Maßnahme im technischen Bereich der Verkehrsmittel, bezogen auf den Verbrauch *o h n e* Veränderung, ist stark abhängig von den Einsatzbedingungen und Betriebsweisen. Außerdem kann der positive Effekt einer Energiesparmaßnahme durch die damit verbundene Veränderung anderer Einflußfaktoren verringert oder gar kompensiert werden (zum Beispiel Erhöhung der Gesamtmasse eines Transportelements durch Einbau eines Gyros (Schwungrads) zur Spei-

cherung kinetischer Energie). Die Angaben über theoretisch mögliche Energieeinsparungen beziehen sich stets auf den spezifischen Verbrauch *e i n e s* Verkehrsmittels, nicht aber auf den Gesamtenergieverbrauch im Personenverkehr (vgl. Abschnitt 6). So kann sich der spezifische, auf die Einheit der Verkehrsarbeit [Pkm] bezogene Energieeinsatz beispielsweise bei baulichen und verkehrsbetrieblichen Maßnahmen zur Verbesserung und Homogenisierung des Verkehrsflusses im innerstädtischen Individualverkehr um bis zu ca. 70 % *j e* *V e r k e h r s m i t t e l* reduzieren. Bei einer Verlagerung innerstädtischen Berufsverkehrs mit Pkw-Fahrzeugen auf Massenverkehrsmittel hoher Auslastung sind Energieeinsparungen um bis zu 80 % *j e* *R e l a t i o n* möglich. Um jedoch die gesamte einzusparende Energiemenge solcher Maßnahmenkomplexe quantifizieren zu können, bedarf es umfangreicher Berechnungen mit Hilfe von Verfahren, wie sie in Abschnitt 6 kurz umrissen sind.

Werden mehrere Energiesparmaßnahmen zugleich angewendet, so vermindern sich die Einzeleffekte entsprechend der Anzahl und Art der angesetzten Maßnahmen.

Neuartige Antriebsarten, wie Wankelmotoren, Stirlingmotoren, Wasserstoff- und methanolbetriebene Ottomotoren, Gas- und Dampfturbinen, Hybride-Antriebe und Elektro-Antriebe für Straßenfahrzeuge, Linearmotoren für spurgebundene Transportmittel, und neue Trage- und Führungstechnologien, wie Magnet- oder Luftkissenschwebetechnik, sind nach momentanem Kenntnisstand nicht dazu geeignet, Energie im Verkehrssektor einzusparen. Diese Antriebs- und Tragetechniken weisen vielmehr gegenüber den konventionellen Systemen aufgrund schlechterer Wirkungsgrade bzw. zusätzlich erforderlicher Trageenergie teilweise einen deutlichen Mehrenergiebedarf auf. Eine Ausnahme bilden Stirlingmotoren und methanolbetriebene Ottomotoren, deren Wirkungsgrade nach heutigem Entwicklungsstand im Bereich herkömmlicher Verbrennungsmotoren liegen. Allerdings liegen die Schadstoffemissionen von flüssiggas- und erdgasbetriebenen Verbrennungsmotoren, insbesondere aber von methanol- oder gar wasserstoffbetriebenen Ottomotoren, die keinerlei Schadstoffe emittieren, deutlich unter den Emissionswerten von mit Otto- oder Dieselmotoren betriebenen Verbrennungsmotoren. Neben diesem Umweltaspekt ist bei der Einführung neuer Antriebssysteme außerdem dem Bestreben Rechnung zu tragen, die risikobehaftete Abhängigkeit vom nur unbestimmt verfügbaren Primärenergieträger Mineralöl abzubauen (vgl. Abb. 5). Insofern darf eine Reduzierung des Energieverbrauchs im Verkehr nicht durch solche Maßnahmen herbeigeführt werden, die außerdem eine Verschlechterung der Umweltbedingungen und Wirtschaftsprozesse bewirken.

5. Zusammenhang zwischen Siedlungsstruktur und Energieverbrauch im Personenverkehr

Ursache für die Nachfrage nach *V e r k e h r s l e i s t u n g e n* und damit für den Energiebedarf im Bereich des Personenverkehrs ist die räumliche Trennung der

MASSNAHMENKOMPLEX	VERKEHRSMITTELHAUPTGRUPPE						ZIEL	THEORETISCH MÖGLICHE ENERGIEEIN- SPARUNG	MÖGLICHE UNER- WÜNSCHTE NEBEN- WIRKUNG
	EISENBAHN	STADTBAHN	BUS	PKW	KRAFTRAD	FLUGZEUG			
Technische und betriebliche Maßnahmen bei der Gewinnung und Transport der Primärenergieträger	Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Primärenergiegewinnung Verminderung des Energiebedarfs zum Primärenergietransport						Reduzierung der Energieverluste bei der Gewinnung und beim Transport der Primärenergieträger	0,5 %	
Technische Maßnahmen bei der Veredlung der Primärenergieträger	Verbesserung der Wirkungsgrade bei der Umwandlung von Primär- in Sekundärenergie in Kraftwerken, Raffinerien und Kokereien durch Recycling-Verfahren; Anwendung der Wärme-Kraft-Kopplung durch Nutzung der Abwärme zur Fernheizung						Reduzierung der Energieverluste in den Umwandlungsstellen der Primärenergieträger	2-7 %	Erhöhung der Schadstoffemissionen beim Verzicht auf Entgiftungsanlagen
Technische und betriebliche Maßnahmen bei der Verteilung der Endenergie	Verkürzung der Transportweiten von der Umwandlungs- zur Verteilerstation durch Optimierung der Standorte der Umwandlungsstationen; Verwendung energiesparsamer Verteilungssysteme						Verminderung des Energiebedarfs und der Verluste beim Transport der Endenergieträger	bis 2 %	erhöhte Schadstoffbelastung der Siedlungsgebiete
Speicherung der Endenergie im Verkehrsmittel			Entwicklung von Elektrobatterien größerer Energiedichte und geringerem Gewicht				Reduzierung der Übertragungsverluste elektrischer Endenergie; Vergrößerung der Reichweiten von Batterie-Fahrzeugen	bis 15%	
Speicherung mechanischer Bewegungsenergie im Verkehrsmittel			Speicherung der kinetischen Energie durch Gyro zwecks Reduzierung des Energieverbrauchs beim Beschleunigungsvorgang				Wiederverwendung kinetischer Energie bei häufig auftretenden Beschleunigungsvorgängen	5-10%	
Nutzung der kinetischen Bewegungsenergie durch Umwandlung in elektrische Energie	Benutzung des Fahrmotors als Generator						Rückspeisung der erzeugten elektr. Energie in das Fahrleitungsnetz bzw. Nutzung zur Fahrzeugheizung	5-15%	
Technische Maßnahmen am Transportgefäß	Verminderung des Eigengewichts je Platz der Transportelemente durch Leichtbauweisen						Verminderung der Totlast	2-10%	Erhöhte Sicherheitsprobleme bei extremem Leichtbau; Stauungen hinter Fahrzeugen mit geringer spez. Motorleistung
	Begrenzung einer weiteren Steigerung der spezifischen Motorleistung [kW/t], da große Antriebsleistungen zur Erhöhung der Beförderungsgeschwindigkeiten genutzt werden						Vermeidung eines erhöhten Energieverbrauchs bei hohen Geschwindigkeiten und großer Anfahrbeschleunigung		
	Verbesserung der Aerodynamik der Transportmittel durch Rundung der Fahrzeugoberflächen, Anordnung von Luftleitblechen, Verkürzung der Wagenabstände bei Zügen (Eisenbahn, Stadtbahn)						Reduzierung des Energieverbrauchs bei höheren Geschwindigkeiten durch geringeren Luftwiderstand	1-5 %	

Blatt 1 zur Systematik möglicher Energiesparmaßnahmen im Personenverkehr

Wirkungsplätze (zum Beispiel Wohn- und Arbeitsplätze) menschlicher Aktivitäten. Neben der Tatsache, daß diese räumliche Trennung Mobilitätswänge (für lebensnotwendige Aktivitäten) erzeugt, entstehen auch Mobilitätswünsche, resultierend aus dem allgemeinen Bedürfnis des Menschen nach Ortsveränderung.

Die in den letzten Jahren stark angestiegene Verkehrsnachfrage wurde zum großen Teil stimuliert durch ein Zusammenwirken von großzügigen Flächennutzungsplänen und Straßenbaumaßnahmen sowie einer Zunahme der Erwerbspersonen und des Kfz-Bestandes.

Der Einfluß der Siedlungsstruktur auf den Energieverbrauch im Verkehr umfaßt neben der Entstehung der Verkehrsnachfrage folgende übergeordnete Einflußbereiche:

- Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf einzelne Verkehrsträger,
- Beförderungsweiten,
- Verkehrsablauf (Betriebsweisen).

Sowohl die Nachfrage nach Personenverkehrsleistungen als auch deren Aufteilung auf die einzelnen Verkehrsmittelgruppen und -wege werden neben dem Verkehrsangebot vor allem bestimmt durch die einer Fahrt entgegenstehenden Widerstände, resultierend aus langer Reisezeit, hohen Fahrtkosten und niedriger Beförderungsqualität. Während für die *Reisezeit*, die sich zusammensetzt aus

- den Zugangs- und Abgangszeiten zum Verkehrsmittel (Fußwegzeiten beim ÖPV und IV; zusätzliche Parkplatzsuchzeiten beim IV),
- den Wartezeiten an Haltestationen des ÖPV,
- der Beförderungszeit (Fahrzeit mit dem Verkehrsmittel),
- eventuellen Umsteigezeiten
- und der Bedienungshäufigkeit (zeitliche Verfügbarkeit) als zusätzlicher Zeitkomponente,

verschiedene Modellansätze zum Modal-Split existieren, sind im europäischen Raum bisher keine Modelle bekannt, die die Verkehrsmittel- und -wegewahl über alle Einflußgrößengruppen (Strukturdaten der Quell- und Zielzellen, Reisezeiten, Reisekosten, Qualitätsmerkmale der Beförderung und Verkehrsangebote) erklären. Bei der Reisezeit, die als bedeutender Modal-Split-bestimmender Einflußfaktor angesehen werden kann, stellt nur die eigentliche Beförderungszeit (einschließlich der Verlustzeiten, bedingt durch Haltezeiten unterschiedlicher Ursache) eine energierelevante Zeitkomponente dar.

Die mittlere *Beförderungsgeschwindigkeit* als reisezeitcharakterisierender Parameter bildet sich durch den Quotienten aus mit dem Verkehrsmittel zurückgelegter Entfernung und der dafür benötigten Beförderungszeit T_{Bef} :

$$V_{\text{mBef}} = \frac{L_{\text{Bef}}}{T_{\text{Bef}}} \text{ [km/h]}$$

Hauptbestimmungsfaktoren für die mögliche Beförderungsgeschwindigkeit V_{mBef} eines bodengebundenen Verkehrsmittels wie auch für die Verteilung der aus der nachge-

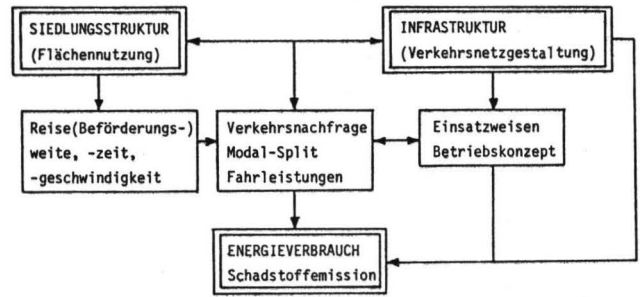


Abb. 9: Schematischer Zusammenhang zwischen Siedlungs- und Infrastruktur sowie Energieverbrauch im bodengebundenen Personenverkehr

fragten Verkehrsleistung folgenden Betriebs(Fahr)leistungen auf einzelne Routen oder Strecken sind die *Siedlungs- und Infrastruktur* und die Belastung (Belegung) der Verkehrsnetze (vgl. Abb. 9).

Neben dem direkten Einfluß der Siedlungsstruktur (Flächennutzung) über die daraus resultierenden Beförderungsweiten und erforderlichen Fahrleistungen existiert auch ein vielschichtiges Spektrum an indirekten Einflüssen auf den Energieverbrauch im Verkehr. So ist der Energieverbrauch bodengebundener Transportmittel weitgehend abhängig von den betrieblichen Einsatzcharakteristika (Betriebskonzept), die im wesentlichen durch den Verlauf der Fahrgeschwindigkeit über der Zeit oder über dem zurückgelegten Weg, das sogenannte *Fahrdiagramm*, gekennzeichnet sind.

Der tatsächliche Geschwindigkeitsverlauf bei der Bewegung eines bodengebundenen Transportmittels wird beeinflusst durch

- den Ausbaugrad der Verkehrswege und -knotenpunkte (Entwurfsgeschwindigkeit, Kurvigkeit, Radien, Knotenpunktgestaltung, Abstand der Störstellen usw.)
- und, insbesondere bei individuellen Verkehrsmitteln, durch die Belastung der Verkehrswege und -knotenpunkte bzw. die Verkehrsstärke.

Bei geringer Verkehrsstärke $M < M^*$ kann mit maximal zulässiger Geschwindigkeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Störstellen (z. B. Kreuzungen) gefahren werden. Im Bereich $M^* < M < M_{\text{max}}$ tritt eine zunehmende, gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer ein, die bei weiter ansteigender Verkehrsstärke zu einer Reduzierung der Leistungsfähigkeit und schließlich zur Stauung führt (vgl. Abb. 10). Die damit verbundene Zunahme des Stillstandanteils an der Gesamtbeförderungszeit bewirkt erstens eine Verminde-

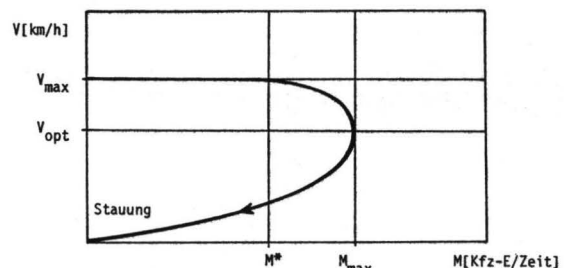


Abb. 10: Beziehung zwischen Geschwindigkeit V des Verkehrstromes und der Verkehrsstärke M auf einer Stadtstraße

MASSNAHMENKOMPLEX	VERKEHRSMITTELHAUPTGRUPPE						ZIEL	THEORETISCH MÖGLICHE ENERGIEEIN- SPARUNG	MÖGLICHE UNER- WÜNSCHTE NEBEN- WIRKUNG
	EISENBAHN	STADTBAHN	BUS	PKW	KRAFTRAD	FLUGZEUG			
Technische Maßnahmen an den konventionellen Antriebsaggregaten der Verkehrsmittel	Regelmäßige Wartung der Antriebsaggregate, Verwendung geeigneter Schmierstoffe		Verwendung von den Einsatzbedingungen optimal angepassten Steuerungssystemen der Fahrmotoren (z.B. Thyristor-Steuerung)				Verbesserung des Wirkungsgrades der Antriebsaggregate	bis 6 %	
Weiter- und Neuentwicklung von Antriebsaggregaten			bei Verbrennungsmotoren: günstigere Gestaltung von Brennräumen und Zündanlagen Ausschöpfung des Verdichtungsverhältnisses Entwicklung geeigneter Vorwärmssysteme zwecks Verkürzung der Warmlaufphase Weiterentwicklung der Kraftstoffeinspritzung und Gemischaufbereitung Einsatz hochwertiger Materialien (Titan, kohlenfaserverstärkte Kunststoffe usw.) für stark beanspruchte Triebwerksteile Abgas-Turboaufladung beim Otto- und Dieselmotor				Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades	2-3 %	ansteigende Beschaffungskosten
							Verminderung der Reibleistung im nicht betriebswarmen Zustand	2-4 %	
							Verminderung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs	3-5 %	teilweise erhöhte Schadstoffemissionen und Beschaffungskosten, begrenzte Anwendbarkeit
							Verbesserung des mechanischen Wirkungsgrades durch Absenkung der Reibleistung	bis 5 %	
	Einführung des 3~Drehstrommotors							6-8 % beim Dieselmotor	eventuelle Abnahme der Haltbarkeit
								4 %	
								bis 8 % teilweise Mehrverbrauch	
							Verminderung der erforderlichen kinetischen Antriebsenergie	bis 8 %	
						Mantelstromturbine	Verbesserung des Wirkungsgrades des Antriebsaggregates	bis 7 %	

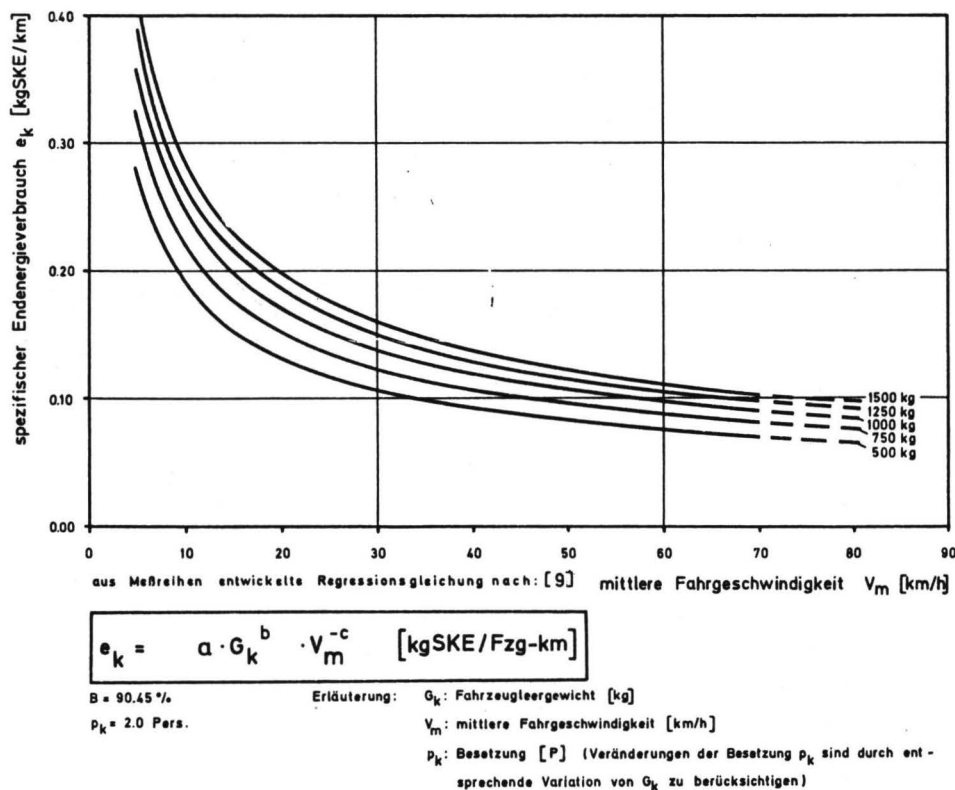


Abb. 11: Spezifischer Endenergieverbrauch e_k von Pkw-Fahrzeugen mit Otto-Antrieb in Abhängigkeit vom Fahrzeuggewicht und der mittleren Fahrgeschwindigkeit unter realen Einsatzbedingungen

rung der mittleren Beförderungsgeschwindigkeit V_{mBef} und damit eine Verschlechterung der Beförderungsgeschwindigkeit, zweitens steigt der auf die Verkehrsarbeit bezogene spezifische Energieverbrauch überproportional an. Diese Störungen im Verkehrsablauf, die in ähnlicher Art (Warten an Signalen) auch im spurgebundenen Verkehr auftreten, haben zur Folge, daß der Ausnutzungsgrad der eingesetzten Endenergie weiter absinkt.

Abb. 11 zeigt den Zusammenhang zwischen spezifischem Endenergieverbrauch e [kg SKE/km] und der mittleren Fahrgeschwindigkeit (= Beförderungsgeschwindigkeit im IV) von Pkw-Fahrzeugen unterschiedlicher Masse mit Otto-Antrieb, der im Rahmen einer Forschungsarbeit für den Bundesminister für Verkehr [9] mit Hilfe einer empirischen Funktion nachgewiesen wurde.

6. Berechnungsverfahren zur Quantifizierung des Energieverbrauchs und zur Wirksamkeitsanalyse von Einsparmaßnahmen im Verkehr

Da der Energieverbrauch der Verkehrsmittel als Ausgang (Output) des Systems Verkehr zu betrachten ist, gilt es bei der Entwicklung eines solchen Modells, nicht nur die verkehrsmittel-, verkehrsweg- und verkehrsbetriebsspezifischen Einflußkomponenten, sondern auch die Bestimmungsfaktoren für die Erzeugung und Verteilung der Verkehrs-[Pkm/tkm] und Betriebsleistungen [Fzg-km] funktional zu erfassen. Prinzipiell sind hierfür zwei unterschiedliche Modellansätze im Bereich des Personenverkehrs denkbar:

6.1. Verkehrszellenspezifische Untersuchung in regional abgegrenzten Räumen (z. B. Städten)

Hierbei könnte ein System von Rechenmodellen, der sogenannte „Vier-Stufen-Algorithmus“, angewendet werden, der bei der Ermittlung des Verkehrsaufkommens, seiner Aufteilung auf die einzelnen Verkehrsträger und Verkehrsmittelgruppen sowie der Verteilung der daraus resultierenden Betriebs- oder Fahrleistungen auf Routen (Straßen, Linien, Streckenabschnitte) von relevanten Strukturdaten einzelner, möglichst kleiner, in sich homogener Verkehrszellen ausgeht. Verfahren dieser Art werden heute in der Verkehrsplanung zur Dimensionierung von Verkehrsanlagen (zum Beispiel Straßen und Kreuzungen) verwendet. Sie enthalten als Bestimmungsvariablen zur Erklärung des Verkehrsaufkommens (Verkehrserzeugung) im Personenverkehr regressionsanalytisch ermittelte, signifikante Strukturdaten der entsprechenden Quell- und Zielzellen, wie

- Lage der Quell- und Zielzelle in der Raumstruktur,
 - Verkehrsangebot öffentlicher und individueller Verkehrsmittel,
 - Wirtschafts- und Besiedlungsstruktur,
 - Einkommensstruktur,
 - Alters- und Erwerbstätigenstruktur,
- und Variablen, wie
- Reisezweck,
 - Haushaltsgröße und Einkommensstruktur,
 - Bildungsstruktur,

MASSNAHMENKOMPLEX	VERKEHRS MITTELHAUPTGRUPPE						ZIEL	THEORETISCH MÖGLICHE ENERGIEEIN- SPARUNG	MÖGLICHE UNER- WÜNSCHTE NEBEN- WIRKUNG
	EISENBAHN	STADTBAHN	BUS	PKW	KRAFTRAD	FLUGZEUG			
Technische Maßnahmen an den Anlagen zur Kraftübertragung	s. Steuerungssysteme		wirtschaftliche Getriebeabstufung durch optimale Anpassung an den Leistungsbedarf (z.B. durch automatische Getriebe)				Betriebsweise des Antriebsaggregats im Bereich hoher Wirkungsgrade	2-4 %	bei automatischen Getrieben teilweiser Wirkungsgradverlust
				Wiedereinführung des "Overdrive"			Verminderung der erforderlichen kinetischen Antriebsenergie	2-8 %	eventuelle Abnahme der Haltbarkeit
	Reduzierung der rotierenden Massenteile bei der Kraftübertragung							Reduzierung der Reibleistung zur Erhöhung des Wirkungsgrades der Kraftübertragung	bis 1%
Technische Maßnahmen an den Hilfseinrichtungen der Antriebe und Transportgefäße	Verbesserung der Luft, Wasser und Schmiermittelführungssysteme (Lüfter, Ventilatoren, Kompressoren, Wasser- und Ölpumpen, Rohrleitungen mit Verengungen und Verzweigungen), Verbesserung elektrischer Hilfsaggregate, Weiterentwicklung eines Zentralhydrauliksystems für unterschiedliche Hilfsaggregate (regelbar)						Verbesserung des Wirkungsgrades der Hilfsaggregate durch Verminderung der Verlustleistung	bis 8%	
	Stärkere Nutzung der Abwärme der Antriebsaggregate zur Heizung der Fahrgasträume, teilweiser Ersatz energieaufwendiger Klimaanlage durch regelbare Frischluftzufuhrsysteme						Verminderung des Energieaufwands für Heizung und Lüftung	bis 10 %	
Trage- und Führungstechnik Verkehrsmittel / Verkehrsweg	Verbesserung der Laufeigenschaften des Rad / Schiene-Systems (z.B. Gleisoberbau mit geringen Toleranzen, Vermeidung von kleinen Radien in der Trassenführung, Verminderung der zulässigen Abnutzungstoleranzen bei den Rädern)		Kfz-Betrieb mit richtigem Reifenluftdruck, Verwendung von hinsichtlich Profil und Aufbau optimierten Reifen zwecks Minimierung der erforderlichen Walkarbeit (z.B. Verwendung von Gürtelreifen)			Verbesserung des Auf- und Abtriebsverhaltens bei wechselnder Last und Fluggeschwindigkeit (s. auch Blatt 1)	Verminderung des Rollwiderstandes (Gleitwiderstandes) beim Kontakt Fahrzeug / Fahrweg bzw. der in Flugrichtung zeigenden Luftwiderstandskomponente bei Flugzeugen	Schiene: bis 1 %	Schiene: unverhältnismäßig ansteigende Bau- und Unterhaltungskosten
			Bau von möglichst glatten Straßenoberflächen, optimale Gestaltung der Straßenoberflächen (Quer-, Längsneigung, Belag) zwecks Verminderung der Wasserfilmdicke bei Regen					Straße: bis 5 %	Straße: Verminderung der Haftreibung (Griffigkeit)

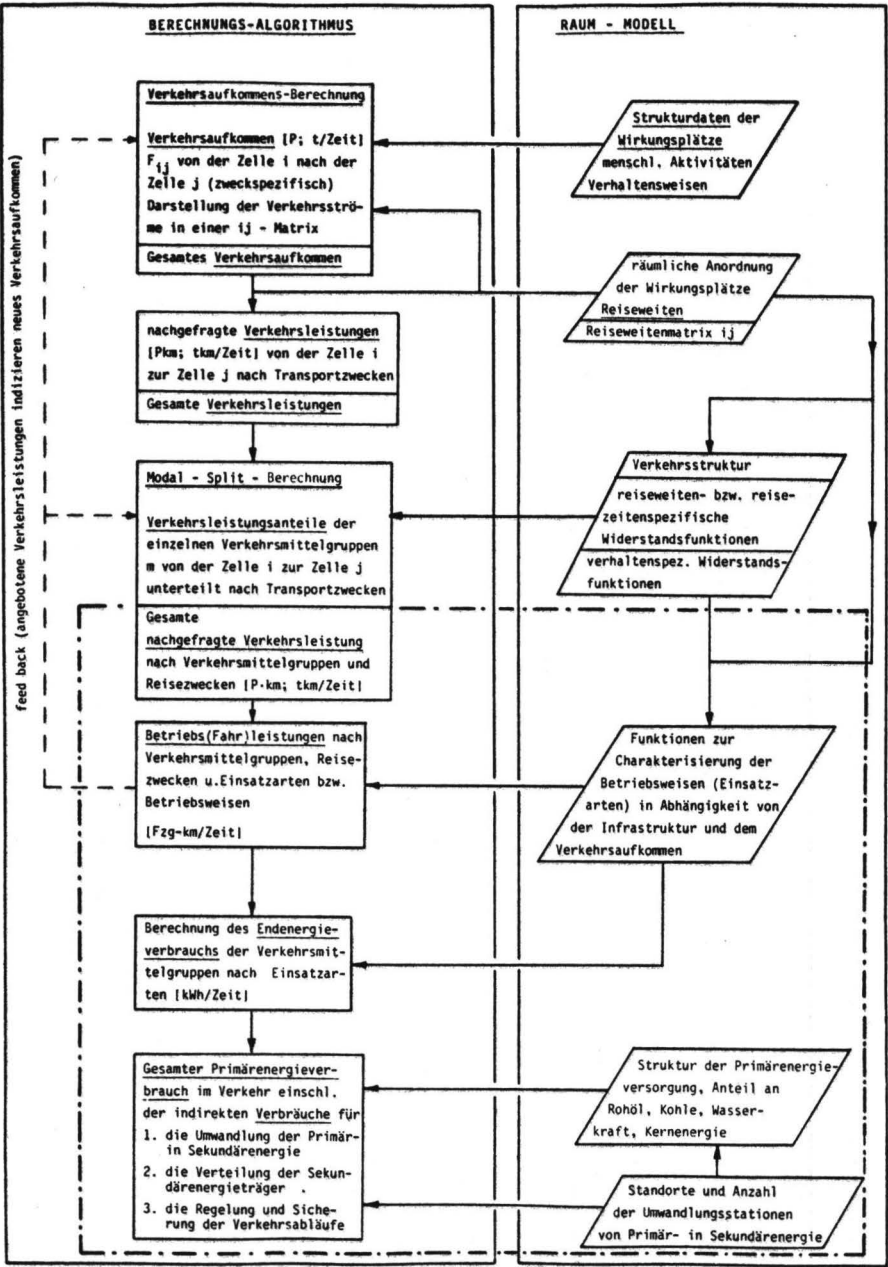


Abb. 12: Raumstrukturorientiertes Rechenschema zur Ermittlung des Energieverbrauchs im Verkehr [11]. Punkt-Strich-Linie = MACSIM-Hüllfläche

- Erwerbstätigen- und Altersstruktur,
- Mobilitätsstruktur, Verkehrsangebot öffentlicher Verkehrsmittel,
- Verkehrs- und Lagegunst, Reisezeiten,

zur Erklärung der Aufteilungsfaktoren (Modal-Split-Faktoren) auf einzelne Verkehrsmittelgruppen. Wie beim Modal-Split liegt auch der Verteilungsrechnung auf Routen ein Gedankenmodell von relationsspezifischen Verkehrswiderständen zugrunde, die bei den bisher bekannten Verfahren im wesentlichen auf der mit zunehmender Entfernung ansteigenden Reisezeit von der Quellzelle i zur Zielzelle j basieren.

Der Vier-Stufen-Algorithmus, der mittlerweile als klassische Methode in der Verkehrsplanung gilt, ermittelt iterativ mit entsprechenden Rückkopplungen die zu erwartende Anzahl Fahrten F_{ijmr} von der Zelle i zur Zelle j mit dem

Verkehrsmittel m auf der Route r . Zur Ermittlung des prognostizierten Energieverbrauchs einer Region ist dieser Algorithmus um drei weitere Stufen, der Berechnung der Verkehrs- und der Betriebsleistung sowie des Energieverbrauchs E_{ijmre} der Endenergieart e , zu erweitern (vgl. [11]).

Durch Summation der E_{ijmre} -Werte über alle Relationen $i-j$, Verkehrsmittel m und Routen r , gegebenenfalls reisezweckspezifisch, wird der Gesamtenergiebedarf E der Endenergieart e im Untersuchungsraum erhalten zu:

$$E_e = \sum_{i=1}^I \left(\sum_{j=1}^J \left(\sum_{m=1}^M \left(\sum_{r=1}^R E_{ijmre} \right) \right) \right)$$

Der Vorzug eines solchen, in Abb. 12 skizzierten Verfahrens liegt in der Darstellungsmöglichkeit der Raumbedeutung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor aufgrund der Tatsache, daß versucht wird, sowohl die Entstehung von

MASSNAHMENKOMPLEX	VERKEHRSMITTELHAUPTGRUPPE						ZIEL	THEORETISCH MÖGLICHE ENERGIEEIN- SPARUNG	MÖGLICHE UNER- WÜNSCHTE NEBEN- WIRKUNG
	EISENBAHN	STADTBAHN	BUS	PKW	KRAFTRAD	FLUGZEUG			
Bauliche Maßnahmen an Verkehrswegen und -netzen	Großzügige Gestaltung und Entflechtung von Knotenpunkten (niveaufrei) Erhöhung der Knoten-, Strecken- und Netzleistungsfähigkeit					Kapazitätserweiterung der Start/Landebahnsysteme der Verkehrsflughäfen	Verminderung verkehrsbedingter Verlust(Warte)zeiten	1-5 %	Störung des Stadt- und Landschaftsbildes durch überdimensionale Verkehrswegebauten
	Optimierung der Streckenausbaugeschwindigkeiten hinsichtlich Bau-, Unterhaltungs- und Betriebsstoffkosten								
	homogene Trassenführung (gleichmäßige Kurvigkeit, Störstellencharakteristik)						Verminderung der Intensität und Häufigkeit von verkehrsbedingten Geschwindigkeitswechseln (Beschleunigungsvorgängen)	bis 10 %	Sonderregelung für Busse kann Verkehrsflußverschlechterung des Individualverkehrs bewirken,
	eigene, vom Individualverkehr getrennte Trassierung					Einrichtung von Sonderspuren und Busschleusen an Ampeln	Verbesserung und Homogenisierung des Verkehrsflusses im Straßenverkehr; Erhöhung der mittleren Beförderungsgeschwindigkeit in Richtung Optimalgeschwindigkeit und Betrieb in relativ energie günstigeren Betriebszuständen, möglichst weitgehende Vermeidung des energieaufwendigen, zähflüssigen PKW-Verkehrs in engen Kernzonen (Parkplatzsuchverkehr)	bis 70 % zusammen mit entsprechenden Maßnahmen nach Blatt 4	teilweise Schmälerung der Energieeinsparung bei flüssiger Fahrt auf Umgehungsstraßen durch längere Fahrwege im Individualverkehr
	Bau von Ortsumgehungen; in Stadtgebieten, deren Kernzonen für den Individualverkehr weitgehend gesperrt sein sollten, einige radiale und je nach Größe ein bis mehrere tangential Magistralen zur Bewältigung der Hauptverkehrsströme					Sonderspuren und Haltebuchten für den ÖPNV zur Verbesserung des Verkehrsflusses im Individualverkehr			
	Einführung von P+R Systemen zur Entlastung der Innenstädte								
	Einrichtung von Parkplätzen an Vorortbahnhöfen					Einrichtung von Parkplätzen und Haltestellen am Rand der Stadtkerne (s. auch Blatt 5)	Anbindung der Flughäfen an Massenverkehrsmittel	bis 80 % je Relation	
	Verminderung der Stärke und Häufigkeit von Steigungstrecken durch möglichst weitgehende Nivellierung der Gradienten						Verlagerung der Verkehrsströme auf energiesparende Massenverkehrsmittel hoher Auslastung		
	Energiewirtschaftliche Trassierung					Begrenzung max. zul. Steigungen beim Entwurf, Bau von Fahrspuren für Nutzfahrzeuge (Kriechspur)	Reduzierung des Energieaufwands zur Überwindung von Höhenunterschieden, bei denen die gewonnene potentielle Energie teilweise durch Bremsung verloren geht	1-5 %	in bergigem Gelände hoher Aufwand für Kunstbauten (Brücken, Tunnel)
	Anordnung der Haltestellen auf den Kuppen der Gradienten								

Blatt 4 zur Systematik möglicher Energiesparmaßnahmen im Personenverkehr

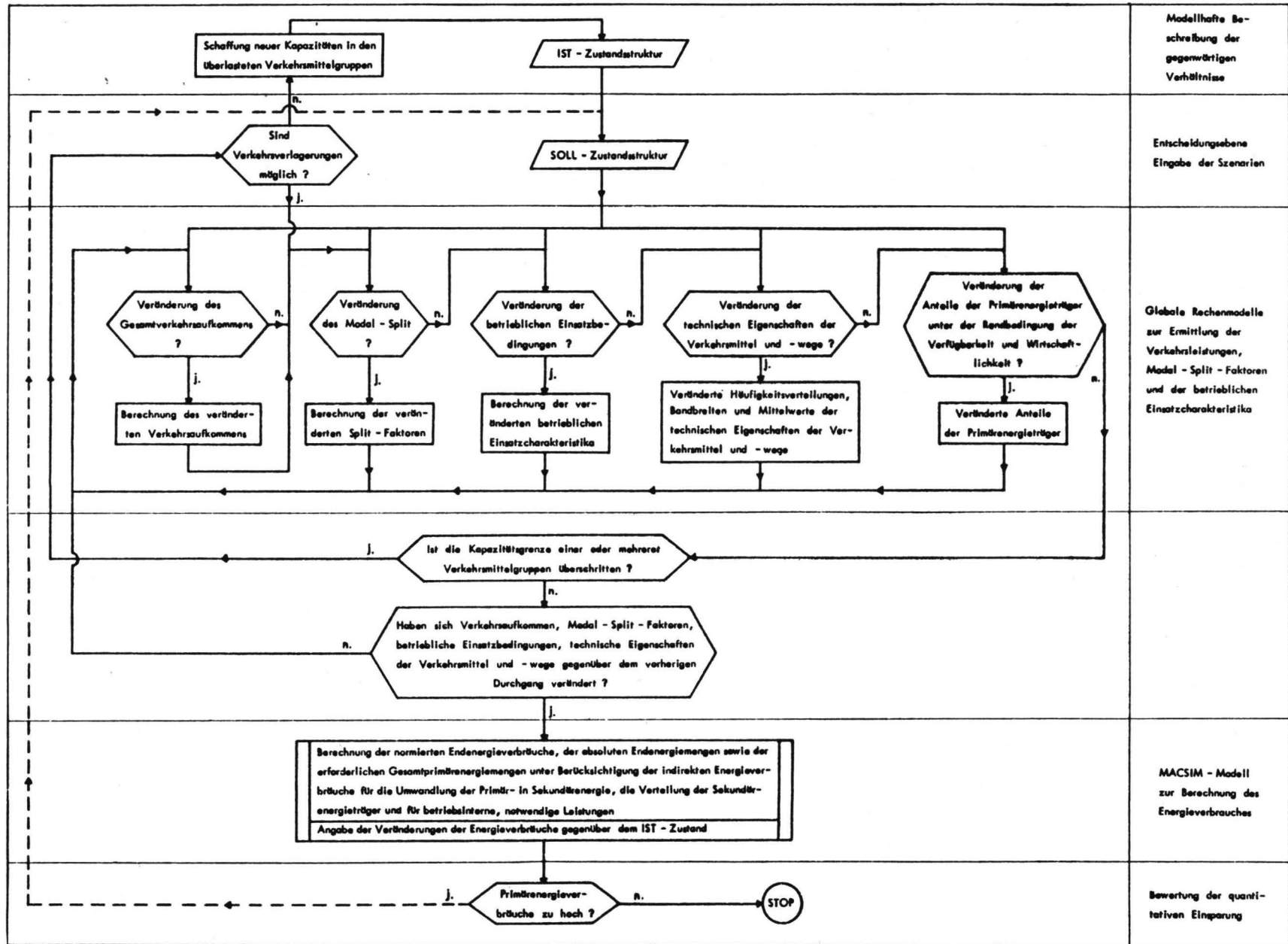


Abb. 13: Flußdiagramm eines dynamischen Simulationsmodells zur Verminderung des Energieverbrauchs im Verkehr [11]

MASSNAHMENKOMPLEX	VERKEHRSMITTELHAUPTGRUPPE						ZIEL	THEORETISCH MÖGLICHE ENERGIEEIN- SPARUNG	MÖGLICHE UNERWÜNSCHTE NEBENWIRKUNG
	EISENBAHN	STADTBAHN	BUS	PKW	KRAFTRAD	FLUGZEUG			
Verkehrsbetriebliche Maßnahmen Betriebsweise der Ver- kehrsmittel	Automatisierung des Betriebsab- laufs, optimale Fahrplanabstim- mung zur Vermeidung von Warte- zeiten Betrieb nach dem wirtschaftli- chen Fahrdiagramm (Einführung von Ausrollphasen)		Einrichtung von "grünen Wellen" und Steuerung der Geschwindigkeiten der Verkehrsströme mit Geschwindigkeitsrichtangaben zur Vermeidung der "Stop and Go"- Betriebsweisen Verkürzung der Haltezeiten durch Schaffner- einsatz energiesparende Fahr- und Betriebsweisen: Mit- schwimmen im Verkehrsstrom, Vermeidung häu- figer Geschwindigkeitswechsel, starker, nicht erforderlicher Beschleunigungen, unnötiger Überholvorgänge; Fahren in mittleren Dreh- zahlbereichen; Vermeidung länger andauernder Vollast-Fahrt (Fahrt mit Maximalgeschwindig- keit), Warmlaufphasen und unnötigen Betriebs im Leerlauf; rechtzeitiges Verzögern vor Stör- stellen (Auslaufphase)	großräumige Umfahrungen von Stauungen durch Luftüber- wachung und Rundfunkinfor- mation Sperrung der Stadtkerne für den Individual- verkehr bei gleichzeitiger Einrichtung von Parkflächen an der Peripherie und ggf. P+R- Systemen s. auch Blatt 4		Vermeidung von Warteschleifen über Flughäfen durch optimale Flugplanung und s. Blatt 4	Homogenisierung des Ver- kehrsflusses Anhebung der mittleren Be- förderungsgeschwindigkeit im zählflüssigen Individualverkehr in Richtung Optimalgeschwin- digkeit; Reduzierung der ver- kehrlich bedingten Verlustzei- ten, Häufigkeit und Intensität von Geschwindigkeitswechseln sowie der Beschleunigungen; Betrieb im günstigen Wirkungs- gradbereich der Antriebsaggre- gate; Vermeidung von Energie- aufwand ohne Erbringung einer Transportarbeit	bis 70 % zusammen mit entsprechenden Maßnahmen nach Blatt 4	s. Blatt 6
							Vermeidung des energieauf- wendigen, bedeutenden Park- platzsuchverkehrs und von Stauungen infolge zu dichten PKW-Verkehrs in engen Stadt- kernen mit geringer Straßen- kapazität		
						Flug in der sog. optimalen Flug- höhe und mit der optimalen Flug- geschwindigkeit	Reduzierung der Bewegungswi- derstände und des erforderli- chen Treibstoffbedarfs	bis 6 %	

Blatt 5 zur Systematik möglicher Energiesparmaßnahmen im Personenverkehr

Personenverkehrsleistungen und Betriebsleistungen als auch den Verkehrsablauf relationsscharf aus relevanten Strukturdaten zu erklären.

Nachteile ergeben sich aus dem außerordentlich hohen Bedarf an Datenmaterial und der begrenzten Anwendbarkeit, da die im Vier-Stufen-Algorithmus implizierten sogenannten verhaltensorientierten Funktionen nur für bestimmte, regional abgegrenzte Räume gültig sind.

6.2. Globalansätze bei überregionalen Untersuchungen

Für die Abschätzung des Verkehrsaufkommens und seiner Verteilung auf die Verkehrsträger im Bereich des Personenfernverkehrs existieren ähnliche Modelle wie im Personennahverkehr. Ihre Zellenstruktur ist dem Untersuchungsziel entsprechend grob untergliedert. Aufgrund dieser rechen-technisch bedingten Grobstrukturierung des Untersuchungs- raumes bleiben mit wachsender Zellengröße in zunehmendem Maße die Binnenverkehrsaufkommen (Nahverkehr) der einzelnen Verkehrszellen unerfaßt, so daß auf diese Weise Teilmengen des Gesamtverkehrsaufkommens bestimmt werden. Die Gesamtbetrachtung des Energieverbrauchs (und der Schadstoffemissionen) im Verkehrssektor eines Landes ist jedoch mit Modellansätzen, die das Verkehrsaufkommen nur für Teile des Personenverkehrs (Nah- und Fernverkehr reisezweckspezifisch) erklären, nicht möglich.

Demgegenüber empfiehlt sich nach Auffassung des Autors unter oben genannter Problemstellung die Betrachtung des Untersuchungsraumes als eine abgeschlossene Verkehrszelle, für die das Binnenverkehrsaufkommen sowie seine Verteilung auf einzelne Verkehrsmittelgruppen mittels empirischer Verfahren aus Strukturdaten des Gesamtgebietes errechnet werden. Als mögliche Erklärungsvariable eines solchen Globalverfahrens sind zum Beispiel folgende Einflußfaktoren in Betracht zu ziehen:

- Verteilung der Einwohner auf städtische und ländliche Gebiete,
- Wirtschaftsproduktivität (Bruttosozialprodukt, Bruttoinlandsprodukt),
- mittlere Entfernung der Siedlungsschwerpunkte,
- Kfz-Dichte (Pkw, Kraftrad) pro Einwohner,
- Verkehrsangebot der öffentlichen Verkehrsmittel,
- Straßennetzdichte (Autobahnen, übrige Straßen),
- Maschenweite der ÖPV-Netze.

Globalbetrachtungen dieser Art bieten die Möglichkeit, Auswirkungen von verkehrspolitischen Maßnahmen auf den Energieverbrauch im Personenverkehr eines überregionalen Untersuchungsgebietes (zum Beispiel eines Landes), aber auch eines regional abgegrenzten Gebietes (z. B. einer Stadt) zu analysieren. Abb. 13 zeigt ein schematisches Flußdiagramm eines dynamischen Simulationsmodells zur Verminderung des Energieverbrauchs im Verkehr, bei dem auch die sogenannten Sekundäreffekte der angesetzten Maßnahmen (zum Beispiel Verbesserung des Verkehrsflusses im verbleibenden

Individualverkehr (IV) bei teilweiser Verlagerung des IV auf öffentliche Verkehrsmittel) durch Iteration erfaßt werden sollen. Hierzu ist die Festlegung und Eingabe verkehrs-, raumordnungs-, umwelt und allgemeinpolitischer Szenarien erforderlich.

Die Anwendung solcher dynamischer Simulationsverfahren bereitet jedoch zur Zeit noch erhebliche Schwierigkeiten, die im wesentlichen auf die Anforderung zurückzuführen sind, daß alle bedeutenden Einflußfaktoren und deren Zusammenhänge in funktionaler Form vorliegen müssen. Hier bietet sich der in [11] entwickelte Berechnungsalgorithmus MACSIM an, der bei der Berechnung der Energiebedarfsmengen (und Schadstoffemissionen) im bodengebundenen Personenverkehr von einer vorgegebenen Verkehrssystemstruktur ausgeht, deren Bestimmungskomponenten variable Inputparameter darstellen. Der MACSIM-Algorithmus ist daher auch geeignet, in ein dynamisches Simulationsmodell nach Abb. 13 integriert zu werden.

Literatur

- [1] Lönnecke, G.: Energiesparen bleibt aktuell. In: Oel. Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft. August 1976.
- [2] Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland ab 1961 mit Prognose bis 1985. In.: Gas-Wärme International. 22. Jg. (1973) Nr. 12, S. 496.
- [3] Rettinger, H.: Deutsche Shell AG: Die Mineralölkrise und ihre möglichen Folgen. In: Oel. Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft. März 1974.
- [4] DIW Berlin; Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln; Rhein.-Westf.-Institut für Wirtschaftsforschung, Essen: Die voraussichtliche Entwicklung des Energieverbrauchs in der BRD bis 1985. — 1973.
- [5] Krell, K.: Verkehr und Energiebedarf. In: VDI-Bericht 250. — Düsseldorf 1975.
- [6] Budde, H. J.: Elektrischer Straßenverkehr und sein möglicher Beitrag zur Einsparung und Substitution knapper fossiler Kohlenwasserstoffe. In: VDI-Bericht 250. — Düsseldorf 1975.
- [7] Grundlinien und Eckwerte des Energieprogramms bis 1985. Kabinettsbeschluß vom 23. März 1977. In: Oel. Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft. April 1977.
- [8] Wirtschaft und Statistik 1976. Hrsg.: Statistisches Bundesamt. — Wiesbaden 1976.
- [9] Nebelung, H.; B. Golling; A. Wurm: Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr. Ermittlung und Vergleich der spezifischen Energieverbräuche. Forschungsarbeit des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen für den Bundesminister für Verkehr. — 1976.
- [10] Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1971 und 1973. Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. — Frankfurt a.M. 1971, 1974.
- [11] Golling, B.: Algorithmus zur Quantifizierung des Energieverbrauchs und der Schadstoffemissionen im bodengebundenen Personenverkehr bei alternativen Verkehrssystemstrukturen. Ein Beitrag zur Objektivierung verkehrspolitischer Maßnahmen. Dissertation am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen. (Noch nicht veröffentlicht.)
- [12] Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik im Jahre 1975. Hrsg.: Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. — Essen, Okt. 1976.
- [13] Ritter, O.: Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum. In: Oel. Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft. Januar 1976.

MASSNAHMENKOMPLEX	VERKEHRSMITTELHAUPTGRUPPE						ZIEL	THEORETISCHE MÖGLICHE ENERGIEEIN- SPARUNG	MÖGLICHE UNERWÜNSCHTE NEBENWIRKUNG
	EISENBAHN	STADTBAHN	BUS	PKW	KRAFTRAD	FLUGZEUG			
Politische Maßnahmen a) Verkehrspolitische				Festlegung zulässiger Maximalwerte für DIN-Verbrauch, Antriebsleistung Hubraum, Gewicht Begrenzung der zul. Höchstgeschwindigkeiten auf Landstraßen und BAB Erhöhung der Parkgebühren in den Innenstädten; Sperrung der Innenstädte (s. Blatt 4 u. 5) Einführung von Mautgebühren auf BAB Rationierung der Kraftstoffversorgung; Erhöhung der Mineralölsteuer; allgemeine und spezielle Fahrverbote (Tage, Kennzeichen, Benutzungsart)			Verminderung des spez. Energiebedarfs der Automobile Vermeidung von Betriebsweisen in energieaufwendigen, höheren Geschwindigkeitsbereichen Vermeidung zählflüssigen PKW-Verkehrs in den Innenstädten Verminderung der Betriebsleistungen auf BAB und der Verkehrsnachfrage allgemein allgemein: Attraktivitätsverschlechterung des Individualverkehrs und -verbesserung des ÖPV zwecks Verlagerung auf ÖPV-Transportmittel und Steigerung ihrer Auslastung; Verminderung der Nachfrage nach PKW-Verkehrsleistungen Verbesserung des Verkehrsflusses im Individualverkehr (s. Blatt 4) funktionsgerechte Aufteilung der Gesamtverkehrsnachfrage auf Verkehrsmittelgruppen unter dem Aspekt der Minimierung des Gesamtenergieverbrauchs im Verkehr	bis ca. 20% bis ca. 20% bis 70% s. Blatt 4 u. 5	Bau leistungsschwacher PKW's mit mangelndem Beschleunigungsvermögen für Überholvorgänge BAB mit Entwurfsgeschwindigkeit bis ca. 250 km/h total überdimensioniert Attraktivitätsverlust für die Standorte von Einkaufs- und Geschäftszentren in den City-Bereichen; Entstehung neuer Zentren in Stadtrandlage mit guter Straßenanbindung Überlastung des übrigen Straßennetzes Rückgang automobilorientierter Beschäftigungszweige der Wirtschaft
b) Raumordnungspolitische	Stillegung betriebsarmer Streckenteile der Flächenbedienungs- Verbindung der Siedlungsschwerpunkte; Siedlungsverdichtung um die Erschließungsachsen der Massenverkehrsmittel		weiterer Kapazitätsausbau des Straßennetzes insbesondere in Ballungsgebieten (Einzelmaßnahmen s. Blatt 4) weiterer Ausbau des Straßennetzes in ländlichen Gebieten			Anbindung der Flugplätze an Massenverkehrsmittel (s. Blatt 4)	Verminderung der Verkehrsnachfrage, der Transportweiten und der Betriebs(Fahr)leistungen,	s. Blatt 5	Verschlechterung des Verkehrsflusses infolge zu starker Siedlungsverdichtung; Erhöhte Umweltbelastung in den Verdichtungsgebieten
c) Allgemeinpolitische	Optimierung des Zentralisationsgrades von Siedlungsgebieten unter dem Aspekt von Verkehrsnachfrage, Betriebs(Fahr)leistungen und Verkehrsfluß; Reduzierung der Dezentralisation von Wohn- und Arbeitsplätzen z.B. durch Wohnungsbau in den Geschäftszentren, Ansiedlung von Betrieben in der Nähe von Siedlungsschwerpunkten, Bau von sozialen und kulturellen Einrichtungen (Schulen, Krankenhäuser, Behörden, Kinos, Theater, Läden, usw.) in den Siedlungsschwerpunkten Informationskampagne in der Bevölkerung und Transportorganisationen über energiesparende Verhaltensweisen im Verkehr Abbau der Spitzen der Verkehrsnachfrage und Verlagerung in verkehrsarme Zeiten (z.B. durch gleitende Arbeits- und Geschäftszeiten und stärker gestaffelte Ferienzeiten)						möglichst weitgehende Praktizierung energiesparender Verhaltensweisen (s. Blatt 5) Reduzierung der erforderlichen Betriebsleistungen sowie Erhöhung der mittleren Auslastung im ÖPV; Verbesserung des Verkehrsflusses	s. Blatt 5	Verlangsamung der Wirtschaftsprozesse