

Als flankierende Maßnahme ist ein weiteres Preissystem beim Geschäftsbereich Netz in Vorbereitung: Ein Anlagenpreissystem für die Vermietung oder Verpachtung sonstiger Anlagen. Die Arbeiten für das Anlagenpreissystem sind mittlerweile soweit fortgeschritten, daß mit seiner Veröffentlichung noch dieses Jahr zu rechnen ist.

Im Gegensatz zu Deutschland wird der Zugang Dritter zu den nationalen Fahrwegen auf europäischer Ebene heute eher restriktiv behandelt. Langfristig ist jedoch von einem europaweit ungehinderten Zugang zur Eisenbahninfrastruktur auszugehen. Die bislang stark national geprägten Infrastrukturbetreiber müssen aber die Regeln der freien Marktwirtschaft erst mühsam erlernen. Dabei hat die DB AG bzw. der Geschäftsbereich Netz mit dem vorliegenden Trassenpreissystem die Führung übernommen.

Weiterführende Literatur

- 1) *Freise, Rainer*: Taschenbuch der Eisenbahngesetze, 10. Auflage 1994, Hestra-Verlag, Darmstadt
- 2) *Ilgmann, Gottfried* und *Miethner, Manfred*: Netzstandardisierung und Preisbildung für die Fahrwegnutzung der künftigen Bahn, Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 63. Jahrgang 1992 Heft 4, Seite 203-229, Verkehrs-Verlag J. Fischer, Düsseldorf
- 3) *Kracke, Rudolf*: Untersuchung der betrieblichen Wirkungen eines Trassenpreissystems bei den deutschen Bahnen, Schlußbericht, Hannover 1993
- 4) *Schumann, Jochen*: Grundzüge der mikroökonomischen Theorie, 4., verbesserte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984

Abstract

As with the railway reform of 01 January 1994 the Deutsche Bundesbahn and the Deutsche Reichsbahn were amalgamated to form the Deutsche Bahn AG, subdivided into business units with their own responsibility. The new business unit "Rail Network" operates the rail infrastructure with all the required ancillary facilities. This business unit sells the product "rail infrastructure", previously unknown on the market. By rating this product, the DB AG has broken new ground and has developed, for this purpose, the train path pricing system for the sale of train paths. Thus, apart from the traditional internal customers, external customers now also have the possibility of using the rail infrastructure.

Tempolimits für Personenkraftwagen aus ökonomischer Sicht

v.st.d
v.gg.w
s

VON PETER CERWENKA UND MICHAEL KLAMER, WIEN

1. Einleitung und Zielsetzung

Zwar in unregelmäßigen Abständen, aber offenbar doch hartnäckig unabweisbar werden sowohl in der Verkehrswissenschaft als auch in der Verkehrspolitik Diskussionen über Tempolimits im motorisierten Straßenverkehr (insbesondere im Pkw-Verkehr) geführt. Die Anlässe hierzu variieren beträchtlich: Waren es 1973/74 und 1981 angesichts der beiden Energiepreiskrisen vor allem Argumente des Energiesparens¹⁾, die das Thema in das Blickfeld öffentlichen Interesses rückten, so folgten später Argumente in Bezug auf das Waldsterben²⁾ und in jüngster Zeit auch solche in Bezug auf CO₂-Emissionen.³⁾ Auch Sicherheitsaspekte tauchten immer wieder auf.⁴⁾ In Deutschland betraf die Diskussion vor allem ein bis heute nicht eingeführtes generelles Tempolimit für Personenkraftwagen (Pkw) auf Autobahnen. Dieser Aspekt wurde nach dem Fall von Berliner Mauer und Eisernem Vorhang ideologisch ganz besonders hochgespielt, war das in der ehemaligen DDR gültige Tempolimit von 100 km/h für Pkw auf Autobahnen doch zum Symbol einer verhassten staatlichen Gängelung avanciert, das man demzufolge nach der Wende schleunigst mit in den Abfallimer der Geschichte warf.⁵⁾

Indes – die Probleme blieben bestehen bzw. verschärften sich. Auch wurde zunehmend nicht nur erkannt, sondern auch in der wissenschaftlichen Literatur dokumentiert, daß nicht nur einzelne Wirkungskomponenten eines ordnungspolitischen Eingreifens in das individuelle Geschwindigkeitswahlverhalten von Belang sind (also etwa Energieverbrauch,

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Peter Cerwenka und
Dipl.-Ing. Michael Klamer
Institut für Verkehrssystemplanung
Technische Universität Wien
Gußhausstraße 30/269
A-1040 Wien

- 1) Vgl. z.B.: *Steierwald, G.; Zackor, H.*: Allgemeine Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Autobahnen zur Energieeinsparung im Verkehr? In: Internationales Verkehrswesen, 33 (1981), Nr. 5, S. 334-342.
- 2) Vgl. z.B.: Deutscher Bundestag: Stenografisches Protokoll über die öffentliche Anhörung zu Fragen des Umweltschutzes am Montag, dem 6. Februar 1984, Bonn, Bundeshaus – Drucksache 10/536.
- 3) Vgl. z.B.: *Rommerskirchen, S. et al.*: Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der verkehrlichen CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005. Untersuchung der Prognos AG im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Basel, 1991.
- 4) Vgl. z.B.: Bundesanstalt für Straßenwesen – U4 – Abschätzung der Auswirkungen einer Senkung der Höchstgeschwindigkeit auf das Unfallgeschehen im Straßenverkehr. Bergisch Gladbach, 1984.
Forum Mensch und Verkehr: Erhöhte Verkehrssicherheit durch Geschwindigkeitsdämpfung, Berlin, 1986.
Dietrich, K. et al.: Auswirkungen von Tempo 80/120 auf die Verkehrssicherheit. Zürich, 1988.
- 5) Vgl. hierzu: *Cerwenka, P.*: Verkehr zwischen Planbarkeit und Freiheit. In: Internationales Verkehrswesen, 46 (1994), Nr. 10, S. 557-562.

Schadstoffemissionen, CO₂-Emissionen, Unfallgeschehen, jeweils für sich), sondern daß das Wirkungsbündel insgesamt zu analysieren und zu beurteilen sei.⁶⁾ Allerdings sind uns keine Untersuchungen bekannt geworden, welche die von einer Geschwindigkeitsveränderung betroffenen Wirkungskomponenten in einer „Dimension“ zusammengefaßt und daraus und mit Hilfe von funktionalen Abhängigkeiten zur Geschwindigkeit in mathematisierter Form konkret eine „Optimalgeschwindigkeit“ (die noch genau zu definieren ist) abgeleitet hätten.⁷⁾ Genau dies soll in dem vorliegenden Beitrag versucht werden. Dabei wird als gemeinsame, einheitliche „Dimension“ zur Ermittlung einer „Optimalgeschwindigkeit“ das Geld herangezogen, genauer gesagt sind es die auf einen zurückgelegten Kilometer bezogenen Kosten der Raumüberwindung. Wir sind uns von Anfang an sehr wohl der Kritik bewußt gewesen, welche die ausschließliche Verwendung dieser monetären Dimension angesichts des sehr heterogenen Wirkungsbündels heraufbeschwören kann. Dennoch wollen wir diesen Versuch wagen und ihn der allgemeinen Kritik zur Diskussion stellen, zumal eine (in Größenordnungen) einigermaßen plausible Monetarisierung einzelner Wirkungskomponenten in den letzten Jahren zunehmend mit Erfolg in Angriff genommen wurde und in der Literatur auch dokumentiert ist.

In diesem hiermit der Öffentlichkeit vorgestellten ersten „Anlauf“ beschränken wir uns auf die Ermittlung von (nunmehr als „ökonomisch“ apostrophierten) Optimalgeschwindigkeiten für Pkw, wobei wir dabei kreuzweise zwei Antriebssysteme (nämlich Otto-Pkw und Diesel-Pkw) und drei verursachungs- bzw. betroffenenrelevante Straßenkategorien (nämlich innerorts [ohne Autobahnen], außerorts [ohne Autobahnen] und Autobahnen) jeweils miteinander gekoppelt untersuchen. Dabei wird vereinfacht vom Einzel-Pkw ausgegangen, für dessen Lenker näherungsweise das Geschwindigkeitswahlverhalten nicht durch Linienführung der Straße, durch andere Verkehrsteilnehmer oder durch spezielle örtliche Rechtsvorschriften eingeschränkt ist.

Zusätzlich zu einem von uns als zurzeit am plausibelsten erachteten empirisch abgesicherten Preisgefüge werden noch einige Sensitivitätsberechnungen durchgeführt, denen ganz bewußt in umstrittenen Teilen extrem davon abweichende Variationen zugrundegelegt werden.

Sowohl methodisches Vorgehen als auch das verwendete Mengen- und Preisgerüst werden dabei bewußt bis ins letzte Detail offengelegt und damit nachvollziehbar, damit jeder, der andere Werte für zutreffender hält, rasch Alternativrechnungen durchführen kann, wozu wie sich bald herausgestellt hat – neben besser fundierten Zahlenwerten lediglich ein Taschenrechner benötigt wird.

6) Vgl. z.B.: Retzko, H.-G.; Sturm, P.: Für und Wider von Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen – eine Gesamtbetrachtung. Darmstadt, 1985.

Durth, W.: Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen – Meinungen, Verhalten, Unfälle. In: Straße und Autobahn, 38 (1987), Nr. 9, S., 331-344.

7) Einen Prinzipzusammenhang für den Güterverkehr ohne jegliche empirisch konkretisierte Fundierung und unter Reduktion der Anzahl der Wirkungskomponenten auf zwei, nämlich auf Zeitkosten und nicht näher spezifizierte „Umweltkosten“, skizziert Knoflacher, wobei überdies der von ihm als monoton progressiv („exponentiell“) mit der Geschwindigkeit steigend angegebene Verlauf der „Umweltkosten“ für den Niedrigstgeschwindigkeitsbereich von Kraftfahrzeugen nicht zutrifft, wie noch gezeigt werden wird. Siehe: Knoflacher, H.: Transportkosten – Transportgeschwindigkeit und Folgekosten. In: Straße und Verkehr, 78 (1992), Nr. 7, S. 485-487.

Alle empirischen Berechnungen beziehen sich auf die Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer) des Jahres 1990 mit Preisstand 1990.

2. Die Kostenbestandteile der Raumüberwindung mit Pkw und ihre Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Der monetarisierbare Ressourcenverzehr (d.h. die Kosten) motorisierter Raumüberwindung je zurückgelegtem Kilometer auf dem Verkehrsträger Straße setzt sich nach RAS-W⁸⁾ aus folgenden Komponenten zusammen:

- Investitions- und Unterhaltskosten der Infrastruktur,
- Kfz-Betriebskosten,
- Fahrzeitkosten,
- Unfallkosten,
- Lärmkosten und
- Schadstoffkosten.

Hinzu kommt noch möglicher Ressourcenverzehr aufgrund von sozialer und ökologischer Trennwirkung sowie aufgrund der vermuteten schädlichen Auswirkung einer CO₂-Anreicherung der Atmosphäre durch die vom motorisierten Verkehr verursachte Verbrennung fossiler Kraftstoffe auf das globale Klima.

Für die vorliegende Problemstellung relevant sind allerdings nur jene Komponenten bzw. nur jene Teile von diesen, welche fühlbar von der Geschwindigkeit abhängen. Zur Herausfilterung dieser relevanten Komponenten (teile) mögen folgende Überlegungen dienen:

- Relativ ungeteilte Einigkeit wird man dahingehend erzielen können, daß Investitions- und Unterhaltskosten der Infrastruktur sowie auch Trennwirkungskosten nur in vernachlässigbarer Weise von der Geschwindigkeit abhängen.
- Bei den Kfz-Betriebskosten kann man die Geschwindigkeitsabhängigkeit weitgehend auf den Kraftstoffverbrauch beschränken, ohne eine für die vorliegende Aufgabenstellung relevante Ergebnisverzerrung zu riskieren.
- Bei den Kosten des Lärms, der ja praktisch nur dann zu Belastungen führt, wenn er auf Betroffene („Belärmte“) trifft, ist infolgedessen zwischen den Bereichen „innerorts“ und „außerorts“ zu unterscheiden. Im primär betroffenen relevanten Innerortsbereich dürfte die Lärmbelastung in realen Situationen wegen der vergleichsweise niedrigeren Geschwindigkeiten sowie wegen der Dominanz einer Überlagerung mit anderen Einflußgrößen (etwa häufiges Anfahren und Bremsen an Knotenpunkten oder infolge anderer Behinderungen, häufiges Schalten von einem in den anderen Gang, Überwiegen des drehzahlabhängigen Motorgeräusches) eine isolierte, ausgeprägte Geschwindigkeitsabhängigkeit nur in bescheidenem Ausmaß gegeben sein, weil dieses Maß häufig unterhalb der Wahrnehmbarkeitsschwelle bleibt. Wesentlich maßgebender als die durchschnittlich

8) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS) – Teil: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (RAS-W). Köln, 1986.

gefahrene Geschwindigkeit ist hier das „Geschwindigkeitsrauschen“, also die Streuung der Geschwindigkeiten. Im Außerortsbereich ist in der Tat eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Schallemissionen gegeben, doch sollte es hier – wie ja schon die Bezeichnung „außerorts“ zum Ausdruck bringt – zumindest keine betroffene Wohnbevölkerung geben. Die Beeinträchtigung anderer Daseinsgrundfunktionen als „Wohnen“ muß hier vernachlässigt werden, so daß aufgrund der angeführten Argumentationen der Lärm als geschwindigkeitsabhängige Kostenkomponente in weiterer Folge außer Betracht bleibt.

- Für die Bewertung von möglichen Schäden durch eine CO₂-Anreicherung der Atmosphäre fehlen derzeit konsensfähige Preisvorstellungen, so daß einer ideologischen Vereinnahmung (Apokalypse versus Verharmlosung) Tür und Tor geöffnet sind.⁹⁾ Da das Mengengerüst dieser Wirkungskomponente, also emittierte CO₂-Mengen, aber sehr einfach aus der direkten Proportionalität zur Menge des Kraftstoffverbrauches zu ermitteln ist, läßt sich diese Komponente sehr einfach in einer Sensitivitätsanalyse durch Einbeziehung eines Kraftstoffpreiszuschlages berücksichtigen.

Nach diesen Überlegungen kristallisiert sich heraus, daß bei den nachfolgend genannten Kostenbestandteilen eine deutliche Geschwindigkeitsabhängigkeit zu verzeichnen ist:

- Fahrzeitkosten,
- Unfallkosten,
- Kraftstoffkosten (inklusive allfällig zu berücksichtigender CO₂-Kosten) und
- Schadstoffkosten.

Es ist nicht uninteressant, daß – völlig unabhängig von der vorliegenden Arbeit und mit einer ganz anderen Zielrichtung – in einer früheren Publikation vorgeschlagen wurde, genau diese vier Komponenten des Ressourcenverzehr im Zusammenhang mit der Beurteilung des Einsatzes von Telekommunikation zur effizienteren Gestaltung des Verkehrsablaufes zu einem Effizienzkriterium zusammenzufassen.¹⁰⁾

Diese vier Komponenten sind es auch, welche nachfolgend behandelt werden. Und mit ihnen läßt sich nun auch die Hauptaufgabe des vorliegenden Beitrages beschreiben und die „Optimalgeschwindigkeit“ definieren: Als Optimalgeschwindigkeit (auf der die abschließenden Überlegungen zu einem Pkw-Tempolimit basieren) wird jeweils jene Geschwindigkeit bezeichnet, für welche unter bestimmten (variieren) Bedingungen die Summe der vier Kostenkomponenten für einen zurückgelegten Pkw-Kilometer ein Minimum erreicht. Der konkreten, empirisch fundierten Ermittlung dieser Optimalgeschwindigkeiten ist der Hauptteil der vorliegenden Arbeit gewidmet.

9) Eine erfreulich unideologische, nüchterne Auseinandersetzung mit der Gesamtproblematik CO₂ in übersichtlicher Form bieten: *Böttcher, E.; Metzner, H.* (Hrsg.): CO₂ – Klimabedrohung oder Politik? Bern, 1994.

10) Siehe: *Cerwenka, P.*: Beiträge der Informationstechnik für eine effiziente Verkehrsgestaltung. In: Raumforschung und Raumordnung, 52 (1994), Nr. 4/5, S. 316-321.

3. Ermittlung der funktionalen Abhängigkeiten der einzelnen Kostenbestandteile von der Geschwindigkeit

In den nachfolgenden Unterabschnitten wird für jede der vier genannten, geschwindigkeitsabhängigen Kostenkomponenten einerseits der funktionelle Zusammenhang des Mengengerüsts mit der Geschwindigkeit erörtert und empirisch konkretisiert sowie andererseits das zugehörige Preisgefüge (Wertgerüst) dokumentiert. Da man über Teile des Preisgefüges sehr unterschiedlicher Meinung sein kann, werden in diesen Fällen neben dem von uns als am plausibelsten angesehenen Set von Preisen, das wir als „Standard“-Fall bezeichnen, für eine Sensitivitätsanalyse auch noch Varianten mit veränderten Werten durchgeführt, die wir als fortlaufend nummerierte „Kontrast“-Fälle bezeichnen. In den Ergebnisausweisungen des Abschnittes 5. sind die Ergebnisvarianten unter der selben Numerierung auffindbar. Alle Kostenangaben sind in [DM/Pkw-km] zum Preisstand 1990 ausgewiesen.

3.1 Fahrzeitkosten

Die Fahrzeitkosten k_t ergeben sich als Produkt aus dem Zeitbedarf (=Mengengerüst) und dem Zeitkostensatz p_t (=Wertgerüst). Der Zeitbedarf pro Pkw-Kilometer läßt sich ausdrücken als Kehrwert der Geschwindigkeit V , multipliziert mit dem durchschnittlichen Pkw-Besetzungsgrad b . Damit erhält man:

$$k_t = p_t \cdot b / V \quad (1)$$

k_t ... Fahrzeitkosten [DM/Pkw-km]

p_t ... Zeitkostensatz [DM/Pers-h]

b ... Pkw-Besetzungsgrad [Pers/Pkw]

V ... Geschwindigkeit [km/h]

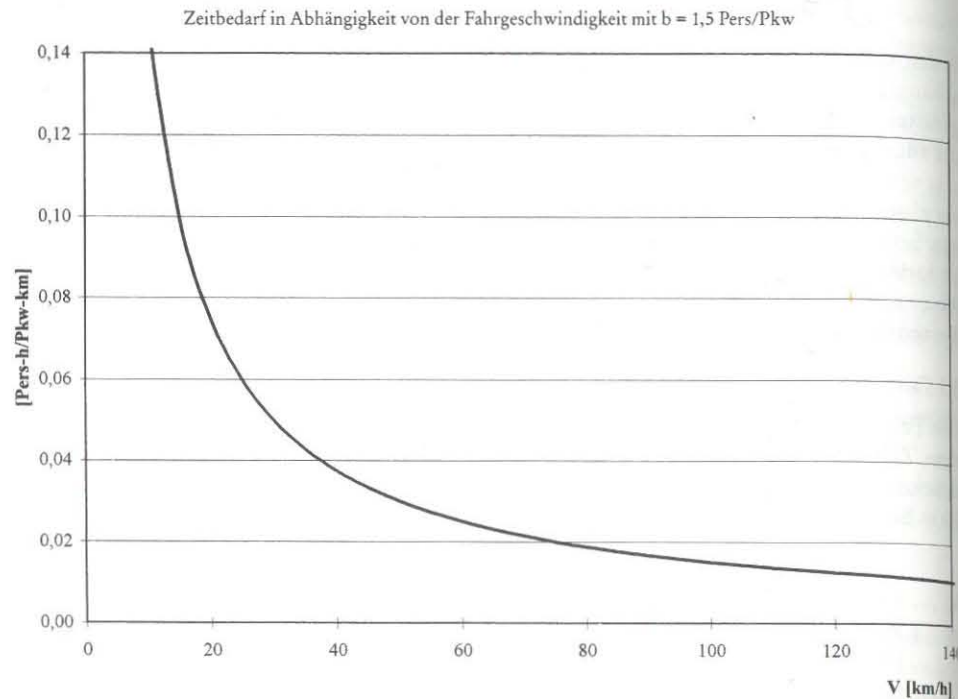
Als Pkw-Besetzungsgrad b wird ein Wert von 1,5 Pers/Pkw in Rechnung gestellt, der etwa als Mittelwert für 1990 aufgefaßt werden kann.¹¹⁾ Damit ergibt sich für den Zeitbedarf der in Abbildung 1 dargestellte Zusammenhang mit der Geschwindigkeit.

Der Zeitkostensatz p_t ist seit jeher ein außerordentlich umstrittener Wert. Es ist nicht das Anliegen dieser Abhandlung, daraus eine unendliche Geschichte zu machen. Vielmehr wird hier ein pragmatischer Weg beschritten: Zur Ermittlung des Zeitkostensatzes wird das Konzept der RAS-W übernommen, wie es im Kommentar zu den RAS-W¹²⁾ im Detail beschrieben ist. Allerdings werden nicht nur der Preisstand, sondern auch die übrigen in die Ermittlung des Zeitkostensatzes einfließenden Größen von 1985 auf 1990 aktualisiert. Für die Arbeitsstunde ergibt sich damit ein Zeitkostensatz von $p_{t,A} = 20,28$ DM/Pers-h, für die Nichtarbeitsstunde ein solcher von $p_{t,NA} = 2,88$ DM/Pers-h. Ordnet man den Fahrtzwecken „Berufsverkehr“ und „Geschäftsverkehr“ die ökonomische Wertigkeit der Arbeitszeit und

11) Vgl. hierzu: *Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.*: Empirische Untersuchungen zum Pkw-Besetzungsgrad. In: Internationales Verkehrswesen, 46 (1994), Nr. 7-8, S. 400-406.

12) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RAS-W Kommentar. Köln, 1987, S. 33-34.

Abbildung 1: Verlauf des Zeitbedarfes



den übrigen Fahrtzwecken die ökonomische Wertigkeit der Nichtarbeitszeit zu und berücksichtigt man, daß im motorisierten Individualverkehr der Anteil der Verkehrsleistungen dieser beiden Fahrtzwecke an der Verkehrsleistung aller Fahrtzwecke im Jahre 1989 34,5%¹³⁾ und im Jahre 1992 39,4%¹⁴⁾ betrug und schätzt man diesen Anteil für 1990 (durch Interpolation) auf rund 36%, so erhält man als Zeitkostensatz einen Wert von $p_t = 9,14$ DM/Pers-h. Für den Standard-Fall wird mit einem gerundeten Wert von 9 DM/Pers-h gerechnet. In der Sensitivitätsanalyse wird dieser Wert für zwei Kontrast-Fälle noch mit den beiden (gerundeten) Werten für die Arbeitsstunde bzw. Nichtarbeitsstunde variiert, so daß insgesamt mit folgendem Wertgerüst gerechnet wird.

Standard: $p_t = 9$ DM/Pers-h

Kontrast 1: $p_t = 3$ DM/Pers-h

Kontrast 2: $p_t = 20$ DM/Pers-h

13) Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung: Verkehr in Zahlen 1993. Berlin, 1993, S. 205.

14) Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung: Verkehr in Zahlen 1994. Berlin, 1994, S. 219.

3.2 Unfallkosten

Physikalische Grundzusammenhänge zwischen Geschwindigkeit und kinetischer Energie (die im Falle eines Unfalles ganz oder teilweise in schadensverursachende Deformationsenergie transformiert wird) einerseits sowie zwischen Geschwindigkeit und Bremsweg andererseits lassen es geboten erscheinen, das monetär bewertete Ausmaß von Unfallschäden (Personen- und Sachschäden) k_U [DM/Kfz-km] mit dem Quadrat der Geschwindigkeit V zunehmend anzusetzen:

$$k_U = c \cdot V^2 \quad (2)$$

k_U wird auch als Unfallkostenrate bezeichnet. c ist eine noch zu bestimmende Eichgröße, deren empirische Ermittlung nun nachfolgend beschrieben wird. Vorab soll jedoch noch festgehalten werden, daß es im Bereich der Unfallkosten bei der vorliegenden Aufgabenstellung nicht notwendig bzw. sinnvoll ist, Mengen- und Wertgerüst voneinander zu trennen (etwa in Unfallraten und Unfallkostensätze), sondern daß es hier einfacher ist, gleich direkt mit Unfallkostenraten k_U zu hantieren.

Wenn man den Zusammenhang nach (2) als gültig akzeptiert und den Gesamtbetrag an jährlichen gesamtwirtschaftlichen Unfallkosten UK [DM/a] in einem abgegrenzten System kennt, so läßt sich die noch unbekannte Eichgröße c über folgende Gleichung ermitteln:

$$\int_F c \cdot V^2 \cdot dF = UK$$

Hierin stellt F mit der Dimension [Kfz-km/a] die Gesamtfahrleistung in eben diesem abgegrenzten System dar. Ersetzt man das Integral durch eine diskretisierte Summierung über alle n besetzten Geschwindigkeitsklassen einer fahrleistungsgewichteten Geschwindigkeitsverteilung, so erhält man folgende Gleichung:

$$c \cdot \sum_{i=1}^n \Delta F_i \cdot V_i^2 = UK$$

Darin bedeutet ΔF_i die in die Geschwindigkeitsklasse i entfallende Teilfahrleistung und V_i den Mittelwert der Geschwindigkeit dieser Klasse. Bildet man Anteile (Häufigkeiten) der Form $h_i = \Delta F_i / F$, so ergibt sich daraus:

$$c \cdot F \cdot \sum_{i=1}^n h_i \cdot V_i^2 = UK$$

Daraus erhält man für c :

$$c = (UK/F) \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n h_i \cdot V_i^2}$$

Führt man mit

$$V_m^2 = \sum_{i=1}^n h_i \cdot V_i^2 \quad (3)$$

eine abkürzende Bezeichnung für das Quadrat einer „mittleren“ Geschwindigkeit ein (wobei darauf zu achten ist, daß es sich bei V_m^2 nicht um das Quadrat des üblichen fahrleistungsgewichteten Geschwindigkeitsmittelwertes, sondern um den fahrleistungsgewichteten Mittelwert von Geschwindigkeitsquadraten handelt), so läßt sich Gleichung (2) wie folgt anschreiben:

$$k_U = (UK / F) \cdot V^2 / V_m^2 \quad (4)$$

Weltweite und langjährige Erfahrungen und Beobachtungen haben ergeben, daß sowohl die Quotienten (UK/F) als auch die Werte für V_m sich signifikant für die drei Straßenkategorien

- Innerortsstraßen (ohne Autobahnen) (IO),
- Außerortsstraßen (ohne Autobahnen) (AO) und
- Autobahnen (AB)

voneinander unterscheiden.

Für die Größen UK liegen in der Differenzierung nach diesen drei Straßenkategorien Werte für das Jahr 1990 vor, allerdings nur für die Summe aller Straßenfahrzeuge (inklusive Fußgänger) und nicht getrennt nach Pkw, Lkw etc. (Tabelle 1).¹⁵⁾ Auch für die Fahrleistungen F (von Kraftfahrzeugen) liegen in derselben Differenzierung Werte für das Jahr 1990 vor (Tabelle 1).¹⁶⁾

Wir unterstellen, daß der Quotient (UK/F) für die Summe aller Straßenfahrzeuge von jenem für Pkw allein nur in (für die vorliegende Aufgabenstellung) unbedeutendem Ausmaß abweicht. Allerdings impliziert diese Annahme, daß bei der Ermittlung von V_m auch die übrigen Fahrzeugarten berücksichtigt werden müssen.

Die Ermittlung von V_m bereitet einige Mühe. Sie würde eine nach Fahrleistungen differenzierte Verteilung der real gefahrenen Geschwindigkeiten des gesamten Kraftfahrzeugkollektivs, differenziert nach den Straßenkategorien, für das Jahr 1990 erfordern. Solche Geschwindigkeitsverteilungen existieren nicht. Lediglich für die Straßenkategorie „Autobahnen“ für Pkw existiert für das Jahr 1987 eine solche Verteilung.¹⁷⁾ Als üblicher fahrleistungsgewichteter Mittelwert \bar{V} wird dort ein Wert von 117,2 km/h für Pkw für 1987 auf Autobahnen angegeben. Wie aber schon betont, ist dieser Wert definitorisch nicht identisch mit unserem Wert V_m . Da in der genannten Quelle aber nicht nur \bar{V} , sondern auch die zugehörige fahrleistungsgewichtete Verteilung angegeben ist, läßt sich V_m in der hier erforderlichen Definition ermitteln. Sie ergibt sich aus Gleichung (3) zu $V_m = 120,5$ km/h.

15) Bundesanstalt für Straßenwesen: Schätzung gesamtwirtschaftlicher Unfallkosten für das Jahr 1990. Bergisch Gladbach, 1992.

16) Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, 1994, a.a.O., S. 157.

17) Heidemann, D.; Hotop, R.: Verteilung der Pkw-Geschwindigkeiten im Netz der Bundesautobahnen – Modellmodifikation und Aktualisierung. In: Straße und Autobahn, 41 (1990), Nr. 3, S. 106-113.

Dieser Wert für 1987 ist nun noch für 1990 zu aktualisieren. Für \bar{V} ist der genannten Quelle zu entnehmen, daß diese Größe von 1982 bis 1987 um insgesamt etwa 5 km/h zugenommen hat, was einer jährlichen Durchschnittszunahme von 1 km/h entspricht. Übernimmt man diese Tendenz auch für V_m und extrapoliert man sie bis 1990, so erhält man für 1990 einen Wert von $V_m = 123,5$ km/h. Allerdings gilt dieser Wert nur für Pkw allein. Schätzt man für Autobahnen den Fahrleistungsanteil des Schwerverkehrs für 1990 auf etwa 10% und dessen V_m auf 85 km/h, so ergibt sich für das hier erforderliche V_m der Wert:

$$V_m = \sqrt{0,9 \cdot 123,5^2 + 0,1 \cdot 85^2} = 120,2 \text{ km/h}$$

Für die weiteren Berechnungen wird ein gerundeter Wert von $V_m = 120$ km/h in Rechnung gestellt.

Für die Straßenkategorien der Innerortsstraßen und Außerortsstraßen fehlen vergleichbare Befunde. Wir haben daher für die Innerortsstraßen einen Schätzwert von $V_m = 45$ km/h und für die Außerortsstraßen einen solchen von $V_m = 75$ km/h in Rechnung gestellt. Sämtliche für die konkrete Berechnung erforderlichen Inputwerte (UK, F und V_m) sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

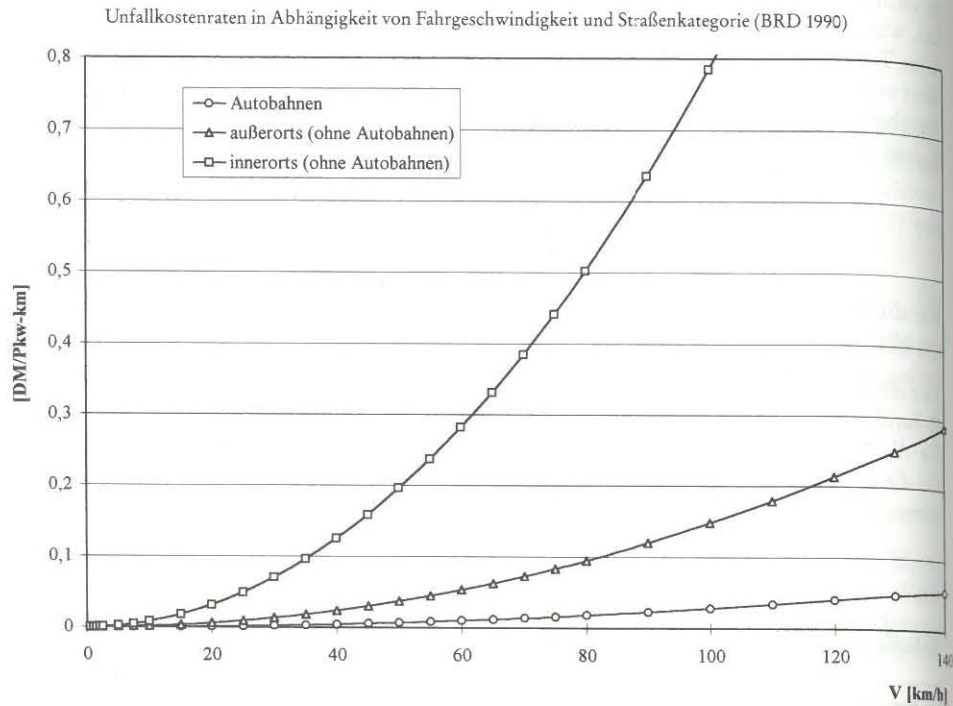
Tabelle 1: Inputwerte für die Unfallkostenermittlung (BRD 1990)

Straßenkategorie	UK [Mio DM/a]	F [Mio Kfz-km/a]	UK/F [DM/Kfz-km \approx DM/Pkw-km]	V_m [km/h]
Innerortsstraßen	21600	135900	0,1589	45
Außerortsstraßen	15600	187000	0,0834	75
Autobahnen	5500	135600	0,0406	120

Am Rande sei noch vermerkt, daß das Verhältnis der durchschnittlichen Unfallkostenraten (UK/F) Autobahnen : Außerortsstraßen : Innerortsstraßen mit etwa 1 : 2 : 4 durchaus den gängigen Erwartungen entspricht, daß sich das Verhältnis geschwindigkeitsabhängiger Unfallkostenraten gemäß Gleichung (4) unter der fiktiven (aber für einen korrekten Vergleich wichtigen) Annahme gleicher Geschwindigkeiten zum Beispiel für $V = 70$ km/h aber noch auf etwa 1 : 5 : 28 verstärkt.

Der Zusammenhang von Gleichung (4) mit den Zahlenwerten der Tabelle 1 ist in Abbildung 2 graphisch dargestellt. Er stellt den Standard-Fall dar. Kontrast-Fälle werden im Bereich der Unfallkosten nicht betrachtet.

Abbildung 2: Verlauf der Unfallkostenraten



3.3 Kraftstoffkosten

Die Kraftstoffkosten k_K je Pkw-Kilometer ergeben sich als Produkt aus spezifischem Kraftstoffverbrauch $e(V)$ und Kraftstoffpreis p_K , wobei zur Dimensionsbereinigung noch durch die Kraftstoffdichte und durch 1000 zu dividieren ist:

$$k_K = p_K \cdot e(V) / (1000 \cdot d) \tag{5}$$

- k_K Kraftstoffkosten [DM/Pkw-km]
- p_K Kraftstoffpreis [DM/l]
- V Geschwindigkeit [km/h]
- $e(V)$ spezifischer Kraftstoffverbrauch [g/Pkw-km]
- d Kraftstoffdichte [kg/l]

Theoretische Überlegungen und empirische Befunde¹⁸⁾ weisen darauf hin, daß im Bereich hoher Geschwindigkeiten der mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunehmende Luftwiderstand als Energieverzehrer dominiert und daß im Bereich niedriger Geschwindigkeiten eine Abhängigkeit des Energieverbrauches vom Kehrwert der Geschwindigkeit dominant

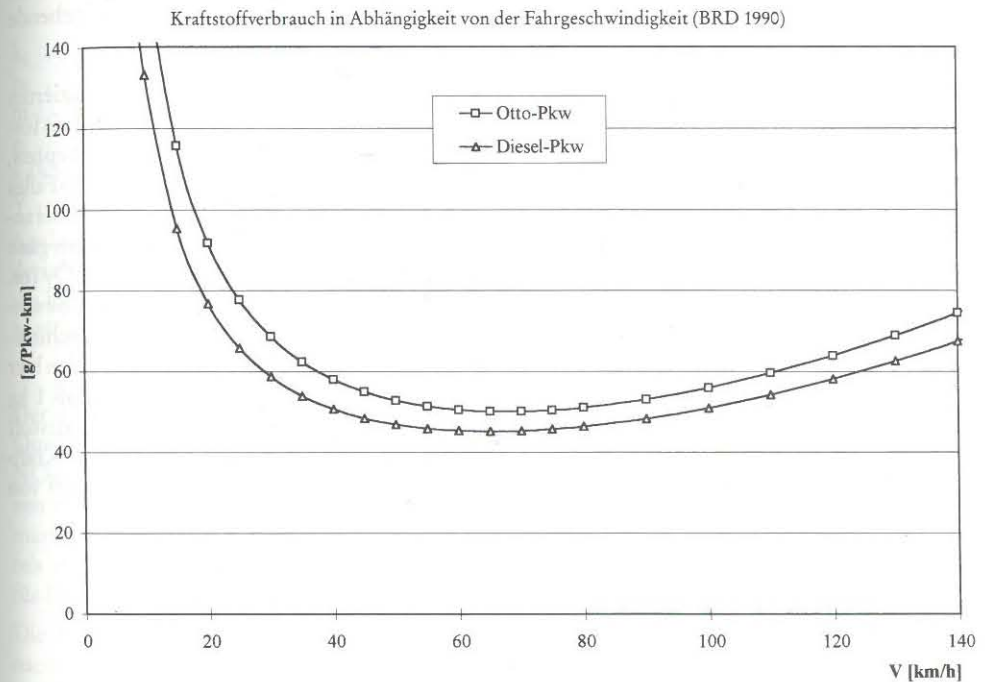
18) Hassel, D. et al.: Abgas-Emissionsfaktoren von PKW in der Bundesrepublik Deutschland – Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990. Abschlußbericht des Technischen Überwachungs-Vereins Rheinland im Auftrag des Umweltbundesamtes. Köln, 1993.

gültig sein muß, da für $V = 0$ km/h (also im Stand bei laufendem Motor) der spezifische Kraftstoffverbrauch (je Pkw-km) ins Unendliche ansteigen muß. Die folgende Funktion genügt diesen Anforderungen und ergibt bei Glättung von Meßwerten durch Regression sehr befriedigende Bestimmtheitsmaße (wie noch gezeigt werden wird):

$$e(V) = a0_K + a1_K \cdot V^2 + a2_K/V \tag{6}$$

Die Werte $a0_K$, $a1_K$ und $a2_K$ werden mit Hilfe von empirischen Meßwerten für $e(V)$, die fahrlistungsgewichtet repräsentativ für das Pkw-Kollektiv des Jahres 1990 für die Bundesrepublik Deutschland sind, getrennt für Otto-Pkw und Diesel-Pkw ermittelt.¹⁹⁾ Die nunmehr als Regressionskoeffizienten zu interpretierenden Werte $a0_K$, $a1_K$ und $a2_K$ sind (gemeinsam mit den für die Schadstoffemissionen analog zu ermittelnden Regressionskoeffizienten $a0_S$, $a1_S$ und $a2_S$) in Abschnitt 3.4 in Tabelle 2 für Otto-Pkw und in Tabelle 3 für Diesel-Pkw mit den Bestimmtheitsmaßen B der Regressionen zusammengestellt. Graphisch sind die Zusammenhänge in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3: Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauches für Otto-Pkw und Diesel-Pkw



19) Empirische Meßwerte aus: Hassel et al., a.a.O., S. 11.5 - 11.9. Insgesamt standen im Bereich der Nicht-Autobahnen Meßmittelwerte für 10 und im Bereich der Autobahnen solche für 7 unterschiedliche Fahrmuster-Durchschnittsgeschwindigkeiten zur Verfügung. Um die Anzahl der Meßmittelwerte für die Regression zu erhöhen, wurden näherungsweise beide Werte-Mengen vereinigt, wobei jedoch im Überlappungsbereich der Geschwindigkeiten der höchste Geschwindigkeitswert der Nicht-Autobahnen (78,3 km/h) und der niedrigste Geschwindigkeitswert der Autobahnen (Bereich 70 – 80 km/h, Durchschnitt: 75 km/h) eliminiert wurden, so daß für jede Regression insgesamt 15 Werte zur Verfügung standen.

Die Dichte für Ottokraftstoff wird mit $d_O = 0,742 \text{ kg/l}$ und für Diesellokraftstoff mit $d_D = 0,832 \text{ kg/l}$ in Rechnung gestellt.²⁰⁾

Als Kraftstoffpreis für den Standard-Fall wird der jahresdurchschnittliche Tankstellenabgabepreis in Rechnung gestellt. Er ist für Ottokraftstoff noch massenanteilig über verschiedene Kraftstoffsorten zu mitteln und betrug solchermassen gemittelt im Jahre 1990 1,20 DM/l; für Diesellokraftstoff betrug er im Jahre 1990 1,02 DM/l.²¹⁾

Der Tankstellenabgabepreis enthält einen erheblichen Anteil staatlicher Abgaben (Mineralölsteuer, Mehrwertsteuer), denen kein unmittelbarer Ressourcenverzehr gegenübersteht. Da diese Abgaben aber (auch ohne explizite Zweckbindung) ihrer ursprünglichen Intention nach stets der (wenigstens teilweisen) Deckung von Verkehrsinfrastrukturkosten dienen, erscheint es gerechtfertigt, sie hier über den Tankstellenabgabepreis mit einzubringen. Allerdings wird damit die in Wirklichkeit wohl nur schwach ausgeprägte Geschwindigkeitsabhängigkeit von Verkehrsinfrastrukturkosten (innerhalb einer bestimmten Straßenkategorie) überzeichnet. Andererseits ist der volle Tankstellenabgabepreis der für das Verkehrsnachfrageverhalten und damit auch für das Gedankenexperiment von Abschnitt 6. maßgebende Wert.

Man könnte in einem Kontrast-Fall auch den um die staatlichen Abgaben reduzierten Kraftstoffpreis in Rechnung stellen. Da dieser Preis aber die langfristig reale Knappheit fossiler Kraftstoffe noch weniger zum Ausdruck brächte als der volle Tankstellenabgabepreis, wird hier davon abgesehen. Statt dessen wird für die Durchrechnung eines Kontrast-Falles die vermutete klimabeeinträchtigende Wirkung des Verbrennungsproduktes CO_2 herangezogen. Wie schon in Abschnitt 2. angedeutet, variieren dabei die Preisvorstellungen ganz erheblich. So wird etwa in einer Schweizer Studie²²⁾ ein „Preis“ von 36 SFr/t CO_2 (ca. 40 DM/t CO_2) angegeben. In einer anderen Studie²³⁾ werden nach verschiedenen Bewertungskonzepten ermittelte Werte (die sehr stark streuen) zusammengetragen, wobei schließlich mit einem Wert von 50 ECU/t CO_2 (ca. 95 DM/t CO_2) gerechnet wird. Wir wollen hier pragmatisch mit einem Wert von 50 DM/t CO_2 rechnen.²⁴⁾ Berücksichtigt man, daß 1 kg Ottokraftstoff bei (vollständiger) Verbrennung 3,12 kg CO_2 und 1 kg Diesellokraftstoff 3,15 kg CO_2 erzeugt, so ergeben sich (unter Berücksichtigung der Kraftstoffdichten) Kraftstoffpreiszuschläge für Ottokraftstoff von $dp_O = 0,12 \text{ DM/l}$ und für Diesellokraftstoff von $dp_D = 0,13 \text{ DM/l}$. Damit gilt für das in Rechnung gestellte Wertgerüst:

Standard: $p_O = 1,20 \text{ DM/l}$, $p_D = 1,02 \text{ DM/l}$
 Kontrast 3: $p_O = 1,32 \text{ DM/l}$, $p_D = 1,15 \text{ DM/l}$

20) Hassel et al., a.a.O., S. 71.

21) Aral AG: Aral-Verkehrstaschenbuch 1991/92. Bochum, 1991, S. E330 und E336.

22) Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal) (Hrsg.): CO_2 -Abgabe: Mehr Markt – bessere Umwelt. Umwelt-Materialien Nr. 15. Bern, 1994, S. 14.

23) Mauch, S. P.; Rothengatter, W. et al.: External Effects of Transport. Final Report on behalf of UIC Paris. Karlsruhe/Zürich, 1994, S. 168.

24) Angesichts der enormen Preisschwankungen erübrigt sich hier eine Spezifikation des Preisstandes.

3.4 Schadstoffkosten

Bei der Ermittlung der Schadstoffkosten k_S wird vom Konzept her analog vorgegangen wie bei der Ermittlung der Kraftstoffkosten, d.h., sie ergeben sich als Produkt aus spezifischen Schadstoffemissionen $s(V)$ und dem Schadstoffpreis p_S . Da die Schadstoffemissionen sich aber aus verschiedenen Schadstoffarten mit unterschiedlichen Toxizitäten zusammensetzen, muß hier noch differenziert werden. Dabei wird näherungsweise das Konzept der mit unterschiedlichen Toxizitätsfaktoren g zu gewichtenden und auf das CO als Bezugsschadstoff aufzuaddierenden Schadstoffmassenaggregation zurückgegriffen.²⁵⁾ Die Schadstoffemissionen $s(V)$ werden also in der Dimension [g CO -Äquivalente] (abgekürzt [g CO -Ä]) ausgewiesen. Dementsprechend wird der Schadstoffpreis p_S in der Dimension [DM/t CO -Ä] angegeben.

Damit ergibt sich analog zu Gleichung (5):

$$k_S = p_S \cdot \sum_{j=1}^m g_j \cdot s_j(V) / 1000000 \quad (7)$$

k_S	Schadstoffkosten [DM/Pkw-km]
p_S	Schadstoffpreis [DM/t CO -Ä]
m	Anzahl der einbezogenen Schadstoffarten
g_j	Toxizitätsfaktor von Schadstoffart j [-]
$s_j(V)$	Schadstoffemissionen von Schadstoffart j [g/Pkw-km]
V	Geschwindigkeit [km/h]

Analog wie in Abschnitt 3.3 für den Kraftstoffverbrauch wird für die Schadstoffemissionen derselbe Funktionstyp wie in Gleichung (6) verwendet, wobei an die Stelle der dort ermittelten Regressionskoeffizienten a_{0K} , a_{1K} und a_{2K} hier für jede Schadstoffart j die Regressionskoeffizienten a_{0j} , a_{1j} und a_{2j} zu ermitteln sind:

$$s_j(V) = a_{0j} + a_{1j} \cdot V^2 + a_{2j} / V \quad (8)$$

Der Ermittlung dieser Regressionskoeffizienten liegen dasselbe Verfahren und dieselbe Quelle wie in Abschnitt 3.3 zugrunde. Als relevante Schadstoffarten wurden CO , HC , NO_x , SO_2 und für Diesel-Pkw auch noch Partikel in Rechnung gestellt. Für SO_2 -Emissionen wurden keine gesonderten Regressionen gerechnet; vielmehr wurde infolge des Massenverhältnisses $\text{SO}_2 : \text{S} = 2 : 1$ die doppelte Masse des im Kraftstoff enthaltenen Schwefels in Rechnung gestellt, dessen Massenanteil 1990 für Ottokraftstoff 0,019 Massen-% und für Diesellokraftstoff 0,155 Massen-% betrug.²⁶⁾

Die Toxizitätsfaktoren sind seit jeher sehr umstritten, und auch die grundsätzliche Frage nach der Addierbarkeit solcherart gewichteter Schadstoffmengen unterschiedlicher Schadstoffarten wird immer wieder neu gestellt. Auch hieraus wollen wir keine unendliche Geschichte machen. Vielmehr bedienen wir uns grundsätzlich der in einer schon zitierten

25) Dogs, E.; Platz, H.: Externe Kosten des Verkehrs – Schiene, Straße, Binnenschifffahrt. Gutachten der PLANCO Consulting GmbH im Auftrag der Deutschen Bundesbahn. Essen, 1991.

26) Schreiben der BP Oil Deutschland GmbH vom 2. 11. 1994. Der Wert für Ottokraftstoff mußte dabei noch über die Massenanteile verschiedener Kraftstoffsorten gemittelt werden.

Literaturquelle²⁷⁾ enthaltenen Angaben. Wegen der sehr großen Unsicherheiten differenzieren wir bei den Toxizitätsfaktoren allerdings nicht nach den beiden Betroffenheitsbereichen „Vegetation“ einerseits (welche eher die Emissionsseite repräsentiert) und „Mensch/Bauten“ andererseits (was primär die Immissionsseite repräsentiert), zumal sich in der genannten Quelle die Werte ohnehin nur für NO_x und SO₂ (und zwar nicht übermäßig) voneinander unterscheiden. Wir haben mit folgenden Toxizitätsfaktoren g_j gerechnet:

$$g_{CO} = 1, g_{HC} = 500, g_{NO_x} = 250, g_{SO_2} = 100, g_{Part} = 100$$

Die ermittelten Regressionskoeffizienten a und Bestimmtheitsmaße B für die Schadstoffemissionen der genannten Schadstoffarten sowie ihre mit Toxizitätsfaktoren (abgekürzt „Tox.-F.“) gewichteten Summen sind gemeinsam mit den Regressionskoeffizienten und Bestimmtheitsmaßen für den Kraftstoffverbrauch K in Tabelle 2 für Otto-Pkw bzw. in Tabelle 3 für Diesel-Pkw zusammengestellt.

Tabelle 2: Regressionskoeffizienten a und Bestimmtheitsmaße B für den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen von Otto-Pkw (BRD 1990)

Tox.-F.	K	a0	a1	a2	B
		17,7660	0,0023606	1461,87	0,9411
1	CO	-2,0023	0,0008431	299,98	0,9335
500	HC	0,275764	0,000019585	32,9727	0,9727
250	NO _x	0,988995	0,000115320	8,2855	0,9402
100	SO ₂ ^{*)}	0,006751	0,000000897	0,5555	–
	CO-Ä	383,8034	0,0395552	18913,25	–

*) SO₂ = 2*0,00019*K

Tabelle 3: Regressionskoeffizienten a und Bestimmtheitsmaße B für den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen von Diesel-Pkw (BRD 1990)

Tox.-F.	K	a0	a1	a2	B
		18,9647	0,0020625	1139,17	0,9593
1	CO	0,0574	0,0000170	24,24	0,9647
500	HC	-0,044245	0,000002796	7,9606	0,9960
250	NO _x	0,295481	0,000024449	11,9200	0,9616
100	SO ₂ ^{*)}	0,058791	0,000006394	3,5314	–
100	Partikel	0,006140	0,000010555	3,6378	0,7738
	CO-Ä	58,2984	0,0092222	7701,46	–

*) SO₂ = 2*0,00155*K

27) Dogs et al., a.a.O., S. 3-28.

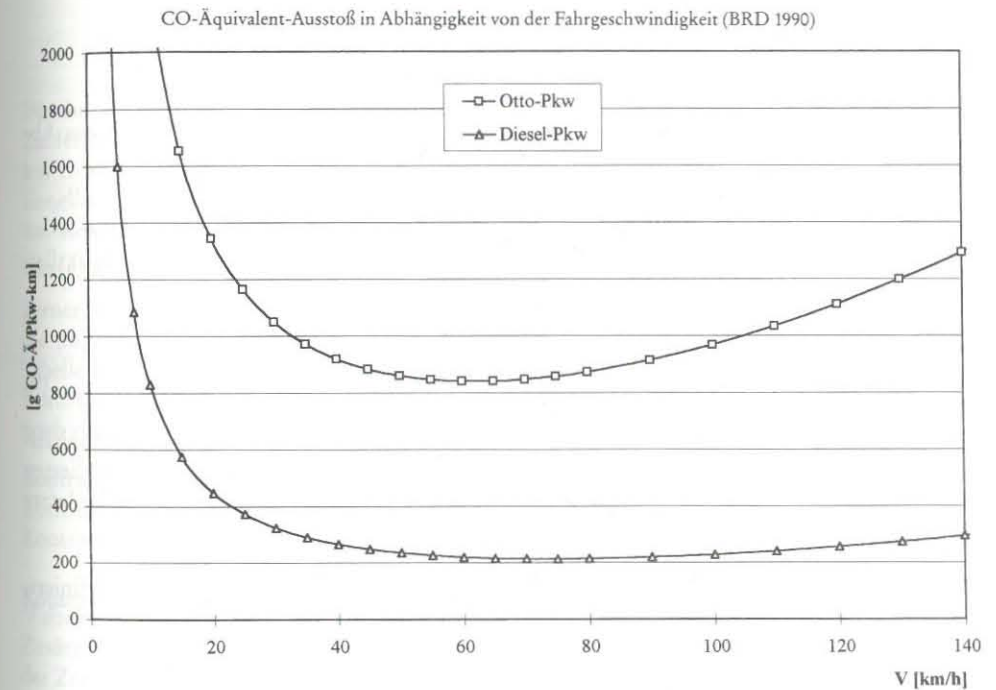
Graphisch sind die Zusammenhänge zwischen Schadstoffemissionen und Geschwindigkeit für Otto-Pkw und Diesel-Pkw in Abbildung 4 dargestellt.

Bei der Ermittlung von Schadstoffpreisen sind – wie schon angedeutet – zunächst zwei unterschiedliche Betroffenheitsbereiche zu unterscheiden, nämlich

- die „Vegetation“, die indirekt infolge Fernverfrachtung, photochemischer Prozesse in der Atmosphäre etc. sozusagen jedenfalls und überall von Schadstoffemissionen betroffen ist, und
- „Mensch/Bauten“, die beide primär durch direkte Immissionen zu Schaden kommen.

Mit den hier gewählten (gegenüber der zitierten Quelle für NO_x und SO₂ leicht modifizierten) Toxizitätsfaktoren läßt sich aus eben dieser Quelle²⁸⁾ für das Jahr 1986 für den Fall (a) ein Schadstoffpreis von 4,22 DM/t CO-Ä und für den Fall (b) ein solcher von 7,66 DM/t CO-Ä rekonstruieren. Rechnet man diese Werte für 1990 hoch und rundet man sie (wegen großer Unsicherheiten) auf grobe Werte auf, so kann man für (a) einen Wert von 5 DM/t CO-Ä und für (b) einen solchen von 10 DM/t CO-Ä ansetzen.

Abbildung 4: Verlauf der Schadstoffemissionen (in CO-Äquivalenten) für Otto-Pkw und Diesel-Pkw



28) Dogs et al., a.a.O., S. 3-24 und 3-66.

Für die hier gestellte Aufgabe wird nun für den Standard-Fall angenommen, daß bei Außerortsstraßen und Autobahnen der Preis von Fall (a) anzusetzen ist und bei Innerortsstraßen die Summe von Fall (a) und Fall (b).

Für die Durchrechnung eines Kontrast-Falles wird das hier nicht klärbare Phänomen aufgegriffen, daß der Preis von 1 t des ungiftigen, aber vermutlich zur Klimaveränderung beitragenden CO₂ mit 50 DM wesentlich höher angesetzt ist als der Preis von 1 t des unbestrittenen schädlichen, giftigen CO mit insgesamt 15 DM. Postuliert man für den Kontrast-Fall, daß der Preis von 1 t CO spürbar über dem Preis von 1 t CO₂ zu liegen habe, so bedeutet dies, daß für den Kontrast-Fall etwa mindestens eine Verfünffachung des Preises für 1 t CO-Ä gegenüber dem Standard-Fall in Rechnung zu stellen ist. Damit ergibt sich folgendes Wertgerüst:

Standard:	Innerortsstraßen:	$p_S = 15 \text{ DM/t CO-Ä}$
	Außerortsstraßen:	$p_S = 5 \text{ DM/t CO-Ä}$
	Autobahnen:	$p_S = 5 \text{ DM/t CO-Ä}$
Kontrast 4:	Innerortsstraßen:	$p_S = 75 \text{ DM/t CO-Ä}$
	Außerortsstraßen:	$p_S = 25 \text{ DM/t CO-Ä}$
	Autobahnen:	$p_S = 25 \text{ DM/t CO-Ä}$

4. Allgemeine Herleitung der Optimalgeschwindigkeit

Die Summe k der geschwindigkeitsabhängigen Kostenkomponenten ergibt sich aus Abschnitt 3. wie folgt:

$$k = k_t + k_U + k_K + k_S \text{ [DM/Pkw-km]}$$

Setzt man für die einzelnen Komponenten die Ansätze aus den Gleichungen (1), (4), (5) mit (6) und (7) mit (8) ein, so erhält man für k :

$$k = p_t \cdot b / V + (\text{UK} / F) \cdot V^2 / V_m^2 + p_K \cdot (a_{0K} + a_{1K} \cdot V^2 + a_{2K} / V) / (1000 \cdot d) + p_S \cdot (a_{0S} + a_{1S} \cdot V^2 + a_{2S} / V) / 1000000 \quad \text{[DM/Pkw-km]} \quad (9)$$

Dabei stellen a_{0S} , a_{1S} und a_{2S} die abkürzenden Schreibweisen für die mit den Toxizitätsfaktoren g_j der Schadstoffarten j gewichteten und über alle Schadstoffarten aufaddierten Regressionskoeffizienten a_{0j} , a_{1j} bzw. a_{2j} der einzelnen Schadstoffarten dar (siehe letzte Zeile von Tabelle 2 bzw. Tabelle 3).

Wie schon erwähnt, wird als „Optimalgeschwindigkeit“ jene Geschwindigkeit definiert, bei der sich für k jeweils ein Minimum einstellt. Zu diesem Zweck ist Gleichung (9) nach V zu differenzieren, und der Differentialquotient ist Null zu setzen:

$$dk/dV = -p_t \cdot b / V^2 + 2 \cdot (\text{UK} / F) \cdot V / V_m^2 + p_K \cdot (2 \cdot a_{1K} \cdot V - a_{2K} / V^2) / (1000 \cdot d) + p_S \cdot (2 \cdot a_{1S} \cdot V - a_{2S} / V^2) / 1000000 = 0 \quad (10)$$

Bildet man abkürzende Schreibweisen A und B der Form

$$A = 2 \cdot [(\text{UK} / F) / V_m^2 + p_K \cdot a_{1K} / (1000 \cdot d) + p_S \cdot a_{1S} / 1000000] \quad \text{und} \quad (11)$$

$$B = p_K \cdot a_{2K} / (1000 \cdot d) + p_S \cdot a_{2S} / 1000000, \quad (12)$$

so erhält man durch Lösung von Gleichung (10) für $V_{\text{opt}} = V$:

$$V_{\text{opt}} = \sqrt[3]{(p_t \cdot b + B) / A} \quad \text{[km/h]} \quad (13)$$

Dieser Rechenvorgang wird für jede der sechs möglichen Kombinationen Otto-Pkw/Diesel-Pkw und Innerortsstraßen/Außerortsstraßen/Autobahnen mit den konkreten Werten aus Abschnitt 3. durchgeführt.

5. Ergebnisse

Für den Standard-Fall sind die Ergebnisse für die Optimalgeschwindigkeiten in der ersten Zahlenzeile von Tabelle 4 und für die zugehörigen minimalen geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten in der ersten Zahlenzeile von Tabelle 5 ausgewiesen. Außerdem werden die funktionellen Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit und geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten für den Standard-Fall in den sechs genannten Kombinationen graphisch dargestellt (siehe Abbildung 5 bis Abbildung 10).

Ferner werden für einige Kontrast-Fälle ebenfalls die Optimalgeschwindigkeiten und die zugehörigen minimalen geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten ausgewiesen (siehe Tabelle 4 und 5, jeweils in den Zeilen unter den Zahlenwerten für den Standard-Fall). Die Kontrast-Fälle 1 bis 4 sind bereits in Abschnitt 3. definiert worden; sie werden nachfolgend noch einmal kurz charakterisiert:

Kontrast 1:	deutlich reduzierter Zeitkostensatz
Kontrast 2:	deutlich erhöhter Zeitkostensatz
Kontrast 3:	erhöhter Kraftstoffpreis zur Berücksichtigung vermuteter Kosten von CO ₂ -Emissionen
Kontrast 4:	deutlich erhöhter Schadstoffpreis

Zusätzlich wird noch ein extremer Kontrast-Fall unter der Annahme durchgerechnet, daß der Zeitkostensatz Null ist (Kontrast 0). Darüber hinaus werden noch Kontrast-Kombinationen durchgerechnet, die bestimmte konträre gesellschaftliche Werthaltungen widerspiegeln mögen:

- Kontrast 1+3+4: „geringe Wertschätzung für Mobilitätszeit“ und „hohe Wertschätzung für die Umwelt“
 Kontrast 2+3+4: „hohe Wertschätzung für Mobilitätszeit“ und „hohe Wertschätzung für die Umwelt“
 Kontrast 0+3+4: „völlig wertlose Mobilitätszeit“ und „hohe Wertschätzung für die Umwelt“

Die Ergebnisse sollen hier nicht weiter kommentiert werden, sondern zum Nachdenken anregen. Gleichwohl wird nun im folgenden Abschnitt noch in einem Exkurs ein Experiment zur Rekonstruktion des Zeitkostensatzes aufgezeigt, und im abschließenden Abschnitt wird schließlich der Brückenschlag zum Tempolimit hergestellt.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Optimalgeschwindigkeiten

Fall	Optimalgeschwindigkeiten [km/h] (BRD 1990)					
	Innerortsstraßen		Außerortsstraßen		Autobahnen	
	Otto-Pkw	Diesel-Pkw	Otto-Pkw	Diesel-Pkw	Otto-Pkw	Diesel-Pkw
Standard	46,0	45,2	75,1	75,4	105,3	111,5
Kontrast 1 (reduzierter Zeitkostensatz)	35,1	33,3	56,9	55,3	79,8	81,9
Kontrast 2 (erhöhter Zeitkostensatz)	58,2	57,9	95,1	96,6	133,4	142,8
Kontrast 3 (erhöhter Kraftstoffpreis)	46,2	45,3	75,0	75,2	103,9	109,7
Kontrast 4 (erhöhter Schadstoffpreis)	46,6	45,6	74,7	75,1	102,3	110,6
Kontrast 3+4	46,8	45,7	74,5	74,9	101,1	109,0
Kontrast 0 (Zeitkostensatz = 0 DM/Pers-h)	25,2	21,0	40,3	34,2	56,4	51,0
Kontrast 1+3+4	36,8	34,4	57,4	55,4	77,9	81,0
Kontrast 2+3+4	58,3	58,1	93,8	95,9	127,3	139,1
Kontrast 0+3+4	28,6	23,6	42,5	35,3	57,7	53,1

Tabelle 5: Zusammenstellung der minimalen geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten

Fall	Minimale geschwindigkeitsabhängige km-Kosten [DM/Pkw-km] (BRD 1990)					
	Innerortsstraßen		Außerortsstraßen		Autobahnen	
	Otto-Pkw	Diesel-Pkw	Otto-Pkw	Diesel-Pkw	Otto-Pkw	Diesel-Pkw
Standard	0,56	0,52	0,35	0,32	0,26	0,22
Kontrast 1 (reduzierter Zeitkostensatz)	0,34	0,29	0,21	0,18	0,16	0,13
Kontrast 2 (erhöhter Zeitkostensatz)	0,88	0,84	0,54	0,51	0,40	0,35
Kontrast 3 (erhöhter Kraftstoffpreis)	0,57	0,53	0,36	0,33	0,27	0,23
Kontrast 4 (erhöhter Schadstoffpreis)	0,61	0,54	0,37	0,32	0,28	0,23
Kontrast 3+4	0,62	0,54	0,37	0,33	0,29	0,24
Kontrast 0 (Zeitkostensatz = 0 DM/Pers-h)	0,19	0,13	0,12	0,09	0,10	0,07
Kontrast 1+3+4	0,41	0,32	0,24	0,20	0,19	0,14
Kontrast 2+3+4	0,93	0,86	0,57	0,52	0,43	0,37
Kontrast 0+3+4	0,27	0,17	0,15	0,10	0,12	0,08

Abbildung 5: Verlauf der geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten (Otto-Pkw innerorts [ohne Autobahnen], BRD 1990)

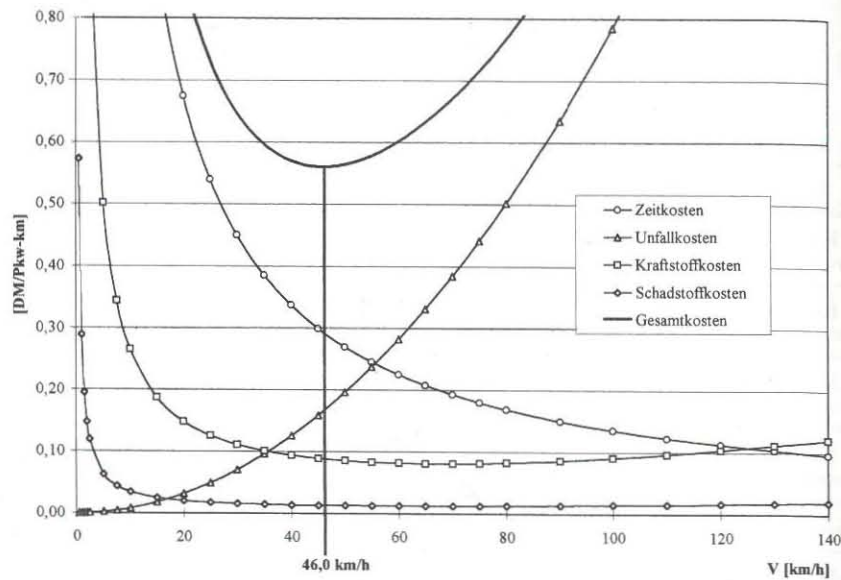


Abbildung 6: Verlauf der geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten (Diesel-Pkw innerorts [ohne Autobahnen], BRD 1990)

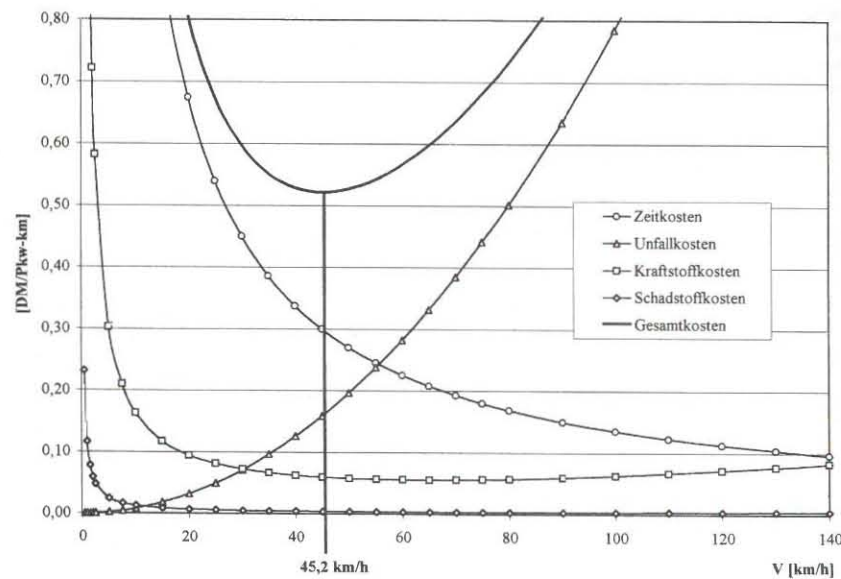


Abbildung 7: Verlauf der geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten (Otto-Pkw außerorts [ohne Autobahnen], BRD 1990)

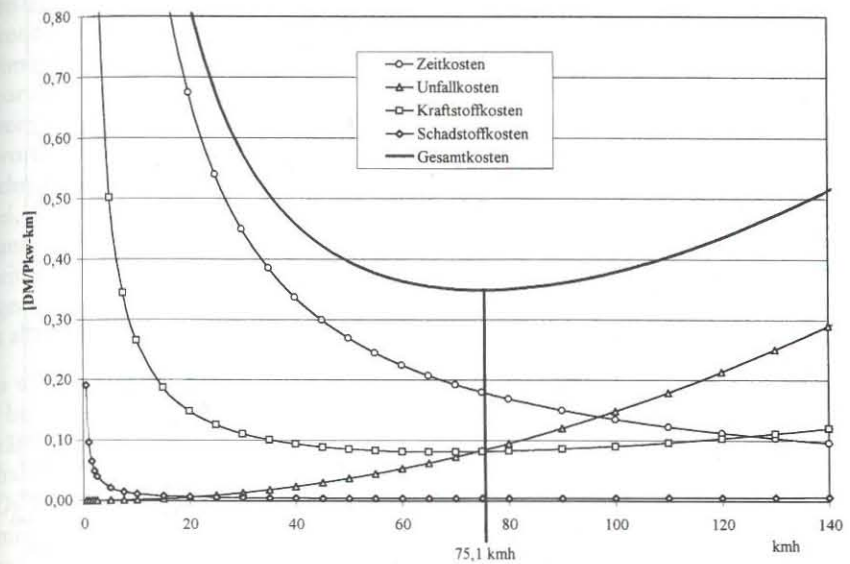


Abbildung 8: Verlauf der geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten (Diesel-Pkw außerorts [ohne Autobahnen], BRD 1990)

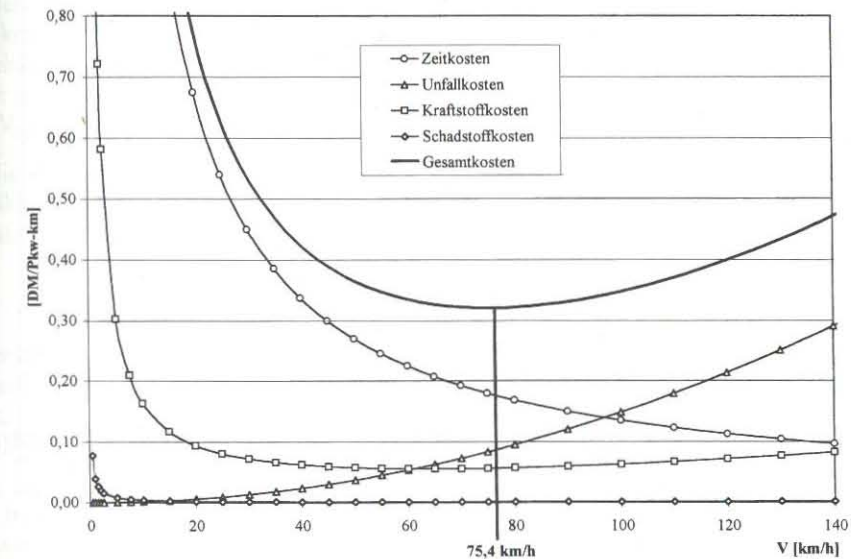


Abbildung 9: Verlauf der geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten (Otto-Pkw auf Autobahnen, BRD 1990)

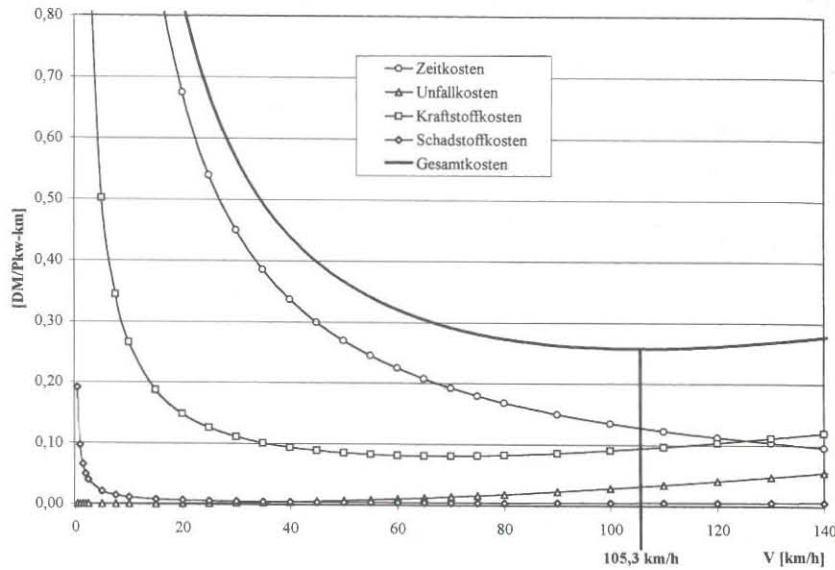
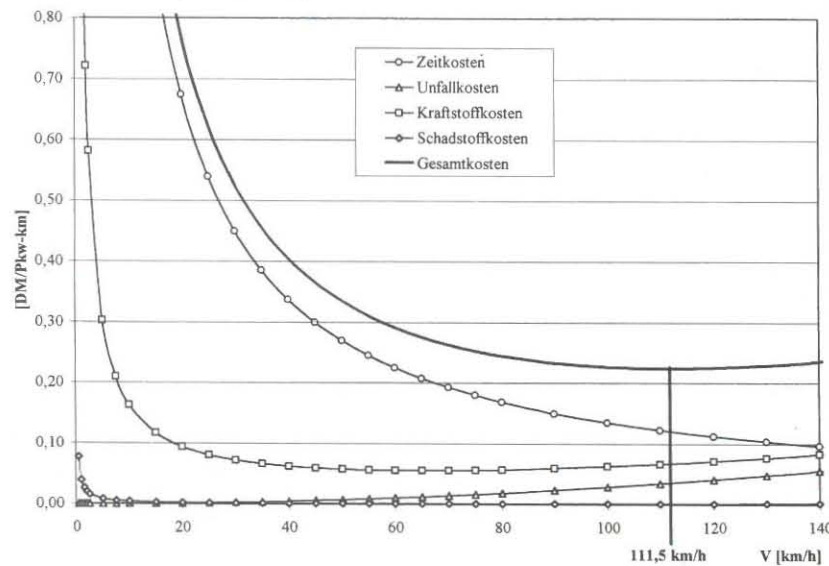


Abbildung 10: Verlauf der geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten (Diesel-Pkw auf Autobahnen, BRD 1990)



6. Exkurs: Experiment zur Rekonstruktion des Zeitkostensatzes

In den letzten Jahren mehren sich in der einschlägigen Literatur Hinweise zu Forderungen, in ökonomischen Beurteilungen von Verkehrsinfrastrukturprojekten Fahrzeitbewertungen zu eliminieren, da es durch infrastrukturelle Verbesserungen ohnehin zu keinen realen Zeiteinsparungen komme und die für Mobilität aufgewendete Zeit je Person und Tag unabhängig vom infrastrukturellen Ausbaustand eine Konstante sei.²⁹⁾ Dieses Phänomen wird außerordentlich kontrovers und ideologisch gefärbt in die Diskussion eingebracht, was manchmal auch zu völlig abwegigen Schlussfolgerungen Anlaß gibt, z. B. zu der, daß es sinnlos sei, die Mobilitätszeit überhaupt ökonomisch zu bewerten. Nachfolgend soll mit einem Gedankenexperiment der Versuch unternommen werden, aus dem realisierten Geschwindigkeitswahlverhalten einen Zeitkostensatz zu rekonstruieren. Damit soll gezeigt werden, daß gerade unser aller Mobilitätsverhalten selbst ein starkes Indiz für die Existenz eines (gar nicht allzu niedrigen) ökonomischen Mobilitätszeitwertes bzw. Zeitkostensatzes liefert.

Dazu wird folgendes (technisch durchaus realisierbare) Szenario angenommen: In jedem Pkw befinde sich (ähnlich wie schon heute in jedem Taxi) ein manipulationssicherer „Kostenzähler“, der allerdings nicht nur das „Kostenintegral“, sondern auch die laufenden geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten anzeigt, und zwar die Summe $k_U + k_K + k_S$ (ohne k_t). Dies wären also die km-Kosten von Kontrast-Fall 0. Diese Kosten müßten (so wie eine Stromrechnung) nach etwa monatlicher oder jährlicher Ablesung unausweichlich an eine Instanz (z. B. an das Finanzamt) abgeführt werden. (Selbstverständlich dürfte dann beim Tanken nichts mehr zu zahlen sein, und auch eine gesonderte Haftpflichtversicherung müßte zuvor abgeschafft werden; sie ist bereits in den Unfallkosten k_U enthalten, die ja über die periodische Überweisung mitzubezahlen wären.) Wenn es sich z. B. um einen Otto-Pkw handelt, so müßte dessen Lenker unter diesen Bedingungen auf Autobahnen mit $V_{opt} = 56,4$ km/h fahren, wenn der Pkw-Lenker seinen Zeitkostensatz tatsächlich mit 0 DM/Pers-h einschätzen und er sich rational-ökonomisch verhalten würde (siehe Tabelle 4, Kontrast 0). Führt er unter den genannten Bedingungen aber nicht mit $V_{opt} = 56,4$ km/h, sondern mit $V > V_{opt}$, so läßt sich daraus seine eigene Zeitbewertung rekonstruieren.

Zu diesem Zweck ist Gleichung (10) nach p_t aufzulösen, wobei dann für V die tatsächlich gewählte Geschwindigkeit einzusetzen ist. Mit den abkürzenden Bezeichnungen A und B gemäß Gleichung (11) und (12) ergibt sich für p_t aus Gleichung (13):

$$p_t = (V^3 \cdot A - B) / b \quad [\text{DM/Pers-h}]$$

Unter der Annahme, daß der Lenker in unserem Beispiel in voller Kenntnis seiner geschwindigkeitsabhängigen km-Kosten allein in seinem Otto-Pkw mit 130 km/h auf der Autobahn fährt, ergäbe sich sein Zeitkostensatz aus seiner eigenen Geschwindigkeitswahl zu ca. 28 DM/Pers-h.

²⁹⁾ Z. B.: *Toopp, H. H.*: Weniger Verkehr bei gleicher Mobilität? In: Internationales Verkehrswesen, 46 (1994), Nr. 9, S. 486-493.

7. Schlußfolgerungen für Tempolimits

Ein staatliches Gemeinwesen, das ein Interesse an seinem stabilen, nachhaltigen Gedeihen hat, wird bemüht sein, seinen Mitgliedern mit Spielregeln an die Hand zu gehen, die einen möglichst schonlichen, effizienten Umgang mit knappen Ressourcen fördern, und eine einsichtige Begründung dafür zu liefern. Dies muß auch für unser Mobilitätsverhalten, zumal im motorisierten Verkehr, gelten, da dessen Verzehr an knappen Ressourcen erheblich ist.

Die vorstehenden Abschnitte haben gezeigt, daß die Geschwindigkeitswahl beim Benützen eines Pkw einen deutlichen Einfluß auf den Ressourcenverbrauch hat. Es ist deshalb durchaus angebracht, wenn dem einzelnen Pkw-Lenker angezeigt bzw. wenn er dazu angehalten wird, seine Geschwindigkeit so zu wählen, daß der Ressourcenverzehr möglichst gering ist. Dies kann unter anderem auch mit gesetzlichen Tempolimits und ihrer strengen Überwachung erfolgen. Wenn man allerdings versucht, die Hintergründe für die gesetzlichen Tempolimits im internationalen Vergleich zu recherchieren, so stößt man in eine Nebelwand. Gesetzliche Tempolimits sind im allgemeinen „irgendwie“ entstanden (historisch tradiert, sukzessive an technische Neuerungen im Straßenbau und in der Automobiltechnik angepaßt, an Bestimmungen von Nachbarländern angeglichen oder aber bewußt gegen sie abgegrenzt etc.). Als Hintergrundmotiv dürfte historisch überwiegend das Argument der Verkehrssicherheit fungiert haben.

In Tabelle 6 findet sich eine auswahlhafte internationale Zusammenstellung von allgemeinen gesetzlichen Tempolimits für Pkw in einer Gliederung nach Straßenkategorien, die mit der hier verwendeten Typologie (Innerortsstraßen, Außerortsstraßen, Autobahnen) weitgehend identisch ist, per Jahresmitte 1994.³⁰⁾

Mit der vorliegenden Arbeit kann nun für allgemeine Tempolimits eine ökonomische Begründung geliefert werden: Tempolimits sollten aus dieser Sicht so beschaffen sein, daß sie ein Fahren im Bereiche des geringsten Ressourcenverzehrs ermöglichen bzw. gewährleisten. Das würde bedeuten, daß allgemeine gesetzliche Tempolimits knapp über den Optimalgeschwindigkeiten V_{opt} liegen sollten, wie sie hier ermittelt wurden.

Ähnliche Straßenanlageverhältnisse und Pkw-Ausstattung wie in Deutschland vorausgesetzt (aber auch ähnliche klimatische Bedingungen; dies gilt wohl nicht für die skandinavischen Länder), hätten unter Zugrundelegung unseres Standard-Falles die Länder Schweiz, Ungarn und die Niederlande (sowie Finnland, wenn der untere Wert der angegebenen Spannweite zum Tragen kommt) mit allgemeinen Tempolimits von 50/80/120 km/h das ökonomische Optimum sehr gut getroffen.³¹⁾ Als gleichwertig gut kann man mit allgemeinen Tempolimits von 50/80/110 km/h auch Dänemark einstufen.

30) Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.): Ferienfahrt 94. Bonn, 1994, S. 12-13.

31) Eher intuitiv waren 80/120 km/h als europaweit zu harmonisierende Tempolimits für Pkw auf Außerortsstraßen/Autobahnen von *Cerwenka* bereits 1990 vorgeschlagen worden (siehe *Cerwenka, P.*: Verkehrsmanagement für internationale Güterfernverkehre; in: Straße und Verkehr, 76 (1990), Nr. 2, S. 63-72).

Tabelle 6: Zusammenstellung von allgemeinen gesetzlichen Tempolimits für Pkw in einigen europäischen Ländern

Land	Allgemeine Tempolimits für Pkw [km/h]		
	Innerortsstraßen (IO)	Außerortsstraßen (AO)	Autobahnen (AB)
A	50	100	130
B	50	90	120
BG	60	80	120
CH	50	80	120
CZ	60	90	110
D	50	100	–
DK	50	80	110
E	50	90	120
F	50	90*	130*
FIN	50	80-100**	120
GB	48	96	112
GR	50	90	120
H	50	80	120
HR	60	90	130
I	50	90	130
IRL	48	96	112
L	50	90	120
N	50	80	90
NL	50	80	120
P	50	90	120
PL	60	90	110
RO	60	70-90***	70-90***
S	50	90	110
SK	60	90	110
SLO	60	80	120
YU	60	80	120

* Trockene Fahrbahn; bei Nässe: 80 km/h (AO) bzw. 110 km/h (AB)

** Je nach Verkehrszeichen

*** Abhängig vom Hubraum der Pkw

Stand: Mitte 1994

Quelle: Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.): Ferienfahrt 94. Bonn, 1994, S. 12-13.

An dieser Stelle ist es unerlässlich, noch einen wichtigen Punkt aufzugreifen, damit die vorliegende Arbeit nicht argumentativ gegen „Tempo 30“ im Innerortsbereich mißbraucht werden kann: Die vorliegenden Berechnungen repräsentieren für Straßen mit überwiegender Verkehrsfunktion und nicht Straßen, in denen infolge der angrenzenden Nutzung andere Funktionen (wie etwa die Aufenthaltsfunktion) überwiegen. Die Frage „Tempo 30“ innerorts kann durch die vorliegende Arbeit nur dahingehend beantwortet werden, daß auf innerörtlichen Straßen mit überwiegender Verkehrsfunktion („Hauptverkehrsstraßen“) mit der derzeitigen technischen Konzeption von Pkw „Tempo 30“ ökonomisch (unter Ein-schluß von Sicherheits- und Schadstoffargumenten) nicht das Optimum darstellt.

Abschließend möchten wir festhalten, daß uns durchaus bewußt ist, daß in unseren hier vorgelegten Berechnungen nahezu jeder einzelne Inputwert in Frage gestellt werden kann. Wir beanspruchen auch nicht, die einzig „richtigen“ Inputwerte gefunden zu haben, wenn-gleich wir bemüht waren, das einschlägige Umfeld möglichst gewissenhaft zu sondieren. Auch haben wir verschiedenen Bewertungsansätzen durch Kontrast-Annahmen Rechnung getragen. Wenn dessenungeachtet jemand anderer besser begründbare, empirisch fundier-tere Werte einbringen kann, so ist er hiermit eingeladen, deren allgemeine Verwendung durch Publizierung zu ermöglichen.

Abstract

Some important cost-components of moving by car are dependent on speed. These components are mainly travel time costs, accident costs, fuel costs and pollution costs. The sum of these four cost-components shows a minimum at special speeds depending on propulsive power of car (Otto-car, Diesel-car) and on road category (within built-up areas, outside built-up areas, highways). These „optimal speeds“ are calculated. If speed limits are to be justified economically, they should be oriented to these optimal speeds, i.e., speed limits should be set up in such a way that driving near optimal speed is possible and guaranteed respectively.

Umweltsteuern als Instrument zur Verringerung von Schadstoffemissionen im Straßengüterverkehr – Ergebnisse einer empirischen Untersuchung –

v.v.b. c
v.st. c
v.gg. b
S

VON HERBERT BAUM UND MEHMET H. SARIKAYA, KÖLN

Inhalt

1. Problemstellung
2. Erhebungskonzept und Struktur der Befragung
3. Wirkungsabschätzung alternativer Umweltsteuern
- 3.1 Eignung von Umweltsteuern zur Einflußnahme auf die Fahrzeugstruktur
- 3.2 Wirksamkeit von Umweltsteuern auf Fahrzeugnutzung und Verkehrsteilung
4. Verhaltensänderungen von Unternehmen des Transportgewerbes und der Unter-nehmen mit Werkverkehr auf höhere Steuerbelastungen
- 4.1 Reaktionen des Transportgewerbes
- 4.2 Reaktionen der Werkverkehr betreibenden Industrie
5. Strategien der Steuer- und Abgabenerhöhung
6. Empfehlungen für eine umweltorientierte Besteuerung im Straßengüterverkehr
- 6.1. Umweltsteuern und ihr Einfluß auf den technisch-organisatorischen Ablauf von Transportprozessen (betriebliche Transportorganisation)
- 6.2. Umweltsteuern und ihr Einfluß auf die Fahrzeugstruktur
- 6.3. Umweltsteuern und ihr Einfluß auf die Verkehrsteilung (Modal Split)
- 6.4. Zusammenfassende Bewertung

1. Problemstellung

In Deutschland wird im Straßengüterfernverkehr eine Verdoppelung der Verkehrsleistung bis zum Jahr 2010 prognostiziert. Angesichts dieses Verkehrswachstums werden verschiedene Möglichkeiten einer Begrenzung der Schadstoffemissionen im Verkehrssektor disku-tiert. Besondere Bedeutung kommt dabei in der politischen Willensbildung einer „Verteue-rung“ des Straßengüterverkehrs zu.¹⁾

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Herbert Baum
Dipl.-Volksw. Mehmet H. Sarikaya
Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln
Universitätsstraße 22
50937 Köln

1) Vgl. dazu die Empfehlungen des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW), Verminderung der Luft- und Lärm-belastungen im Güterfernverkehr 2010 (= Forschungsvorhaben Nr. 104 05 982 des Umweltbundesamtes), Berlin 1994.