

77. Jahrgang – Heft 3 – 2006

## ZEITSCHRIFT FÜR VERKEHRSWISSENSCHAFT

### INHALT DES HEFTES:

- Strukturelle Entwicklungen im deutschen Verkehrssektor Seite 181  
Von Hans-Friedrich Eckey und Matthias Türck, Kassel
- Die Modellierung innerstädtischer Staus und die Wirkungsweise  
ausgewählter wirtschaftspolitischer Maßnahmen –  
eine spieltheoretische Analyse Seite 199  
Von Torsten Marner, Münster
- Cost-Benefit Analyses of Intelligent Vehicle Safety Systems Seite 226  
- Some Empirical Case Studies -  
By Herbert Baum, Torsten Geißler, Sören Grawenhoff and Wolfgang H. Schulz, Cologne

Manuskripte sind zu senden an die Herausgeber:  
Prof. Dr. Herbert Baum  
Prof. Dr. Rainer Willeke  
Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln  
Universitätsstraße 22  
50923 Köln

Verlag – Herstellung – Vertrieb – Anzeigen:  
Verkehrs-Verlag J. Fischer, Paulusstraße 1, 40237 Düsseldorf  
Telefon: (0211) 9 91 93-0, Telefax (0211) 6 80 15 44  
www.verkehrsverlag-fischer.de  
Einzelheft EUR 24,50 – Jahresabonnement EUR 59,00  
zuzüglich MwSt und Versandkosten  
Für Anzeigen gilt Preisliste Nr. 21 vom 1.1.2005  
Erscheinungsweise: drei Hefte pro Jahr

*Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages nicht gestattet, photographische Vervielfältigungen, Mikrofilme, Mikrophotos u.ä. von den Zeitschriftenheften, von einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen.*



## Strukturelle Entwicklungen im deutschen Verkehrssektor

VON HANS-FRIEDRICH EC KEY UND MATTHIAS TÜRCK, KASSEL

### 1. Problemstellung

Der Verkehrsbereich hat eine wichtige volkswirtschaftliche Bedeutung, da er neben der eigenen Bruttowertschöpfung auch die Mobilität von Waren, Dienstleistungen und Arbeitnehmern gewährleistet (Diekmann 2003). Das Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln hat beispielsweise in einer Studie im Auftrag des Deutschen Verkehrsforums mit einer Simulation nachgewiesen, dass ohne das Wachstum des Verkehrssektors zwischen 1965 und 1990 die Bruttowertschöpfung, die Arbeitsproduktivität sowie die Beschäftigtenzahl deutlich geringer wären (Baum 1999). Daneben gibt es aber auch negative externe Effekte vor allem ausgelöst durch Abgase und Lärm.<sup>1</sup> Teilweise wird deshalb überlegt, wie der Verkehr gesenkt werden kann, ohne das Wirtschaftswachstum entscheidend zu verringern (s. z. B. Tight/Delle Site/Meyer-Rühle 2004).

Gleichzeitig ist der Verkehr insbesondere abhängig von Entwicklungen im Nachrichtensektor. Durch die elektronische Übermittlung von Daten in Form von Emails oder Internetformularen werden beispielsweise Briefsendungen zum Teil überflüssig, und Videokonferenzen über Datennetze verringern teilweise die Notwendigkeit von Dienstreisen (Baum 2000). Aufgrund der engen Beziehungen zwischen beiden Bereichen betrachten wir entsprechend der Klassifikation des Statistischen Bundesamtes bei der Input-Output-Rechnung den Bereich Verkehr und Nachrichtenübermittlung gemeinsam.

Die hohe Bedeutung des Verkehrs- und Nachrichtenbereichs zeigt sich auch in seiner zeitlichen Entwicklung im Vergleich zur gesamten Volkswirtschaft (vgl. Abb. 1). So ist der Bruttoproduktionswert dieses Sektors zwischen 1991 und 2002 um 12 % mehr angestiegen als die entsprechende Größe der gesamten Volkswirtschaft. Abb. 1 enthält aber auch eine Differenzierung nach Untersektoren. Der Verkehrsbereich wird entsprechend der Klassifikation des Statistischen Bundesamtes in fünf aggregierte Sektoren "Eisenbahndienstleistungen", "sonstige Landverkehrsleistungen, Transportleistungen in Rohrfernleitungen" oder kurz "sonstiger Landverkehr", "Schifffahrtsleistungen", "Luftfahrtleistungen" sowie

---

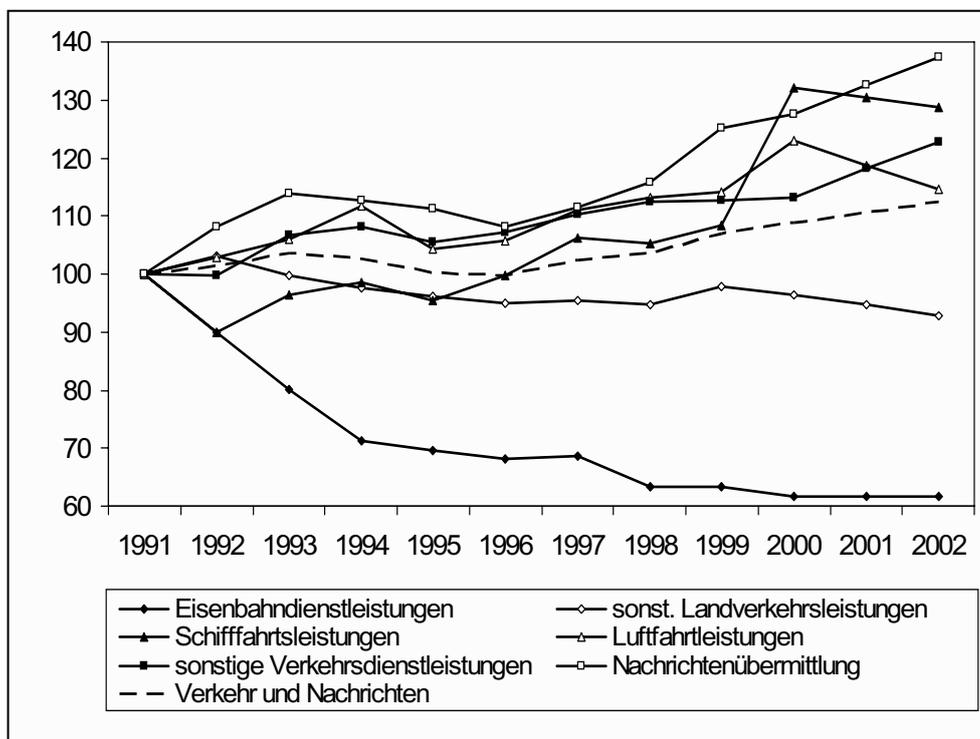
*Anschrift der Verfasser:*

Prof. Dr. Hans-Friedrich Eckey  
Matthias Türck, M. A.  
Universität Kassel  
Nora-Platiel-Str. 4  
34109 Kassel  
e-mail: eckey@wirtschaft.uni-kassel.de

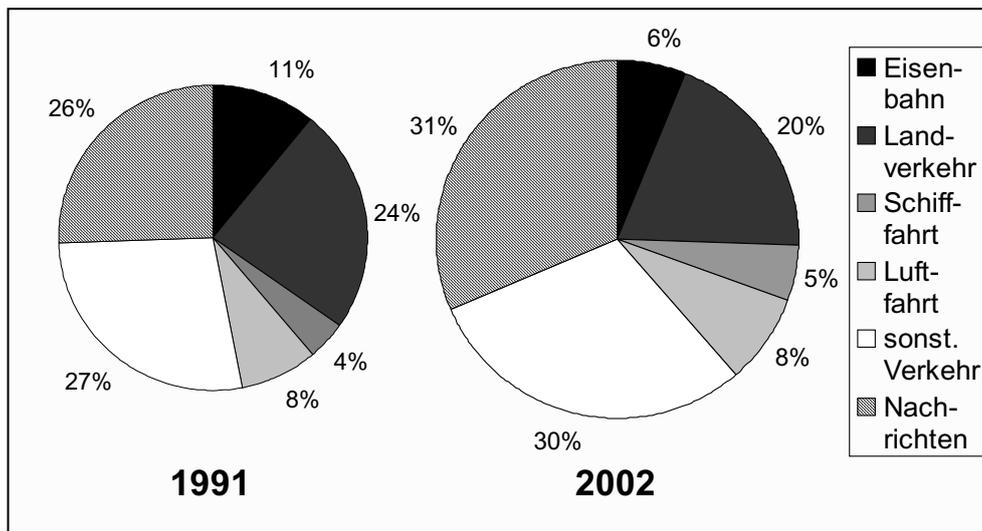
<sup>1</sup> Für die Lärmkosten liegen übrigens auch wertmäßige Schätzungen vor, vgl. beispielsweise Delucchi/Hsu 1998.

"Dienstleistungen bezüglich Hilfs- und Nebentätigkeiten für den Verkehr" (im Folgenden als "sonstiger Verkehr" bezeichnet) unterteilt. Während sich die Nachrichtenübermittlung extrem gut entwickelt hat, ist der Bruttowertsbeitrag von Eisenbahndienstleistungen erheblich gesunken.

**Abb. 1: Entwicklung des Bruttowertsbeitrages relativ zur gesamten Volkswirtschaft**



Noch deutlicher werden die Diskrepanzen, wenn der Anteil der Bruttowertsbeiträge der einzelnen Untersektoren an dem gesamten Bruttowertsbeitrag des Sektors Verkehr und Nachrichtenübermittlung betrachtet wird (vgl. Abb. 2). Während der Anteilswert für Eisenbahndienstleistungen 1991 noch bei 11 % lag, so beträgt dieser 2002 nur noch 6 %. Etwas zurückgegangen sind auch Landverkehrsleistungen, während insbesondere bei der Nachrichtenübermittlung ein Anstieg von 26 % auf 31 % festzustellen ist.

**Abb. 2: Aufteilung der Bruttonproduktion auf einzelne Untersektoren**

Diese Entwicklungen sollen im Folgenden näher untersucht werden. Speziell wollen wir herauszufinden, ob strukturelle Veränderungen im Sektor Verkehr und Nachrichtenübermittlung stattgefunden haben oder ob die aufgezeigten Entwicklungen nur auf Nachfrageänderungen zurückgeführt werden können. Hierbei verknüpfen wir die Input-Output-Analyse mit der Dekompositionsanalyse. Eine ähnliche Analyse liegt für Kanada (Harris 2003), nicht jedoch für Deutschland vor.<sup>2</sup> Das entsprechende Modell wird im zweiten Abschnitt beschrieben. Gegenstand von Abschnitt 3 ist die empirische Analyse. Im Schlussteil erfolgt ein kurzes Resümee.

## 2. Modell

Wir wollen eine Input-Output-Analyse für den Verkehrssektor – gekoppelt mit einer Dekompositionsanalyse – für den Zeitraum 1991 bis 2002 durchführen (s. Skolka 1989 u. Chóliz/Duarte 2006). Beginnen wir mit der Input-Output-Rechnung, die den Output des  $j$ -ten Wirtschaftsbereichs  $X_j$  in den Verbrauch an Vorleistungen aus den  $n$  Sektoren für den  $j$ -ten Sektor,  $X_{j1}$ ,  $X_{j2}$ , ...,  $X_{jn}$ , sowie die Lieferungen an die Endnachfrage  $Y_j$  zerlegt:

<sup>2</sup> Diekmann (2006) hat in einer jüngst erschienenen Studie mit Hilfe der Input-Output-Rechnung die Beziehung zwischen Verkehr und Konsum untersucht. Er führt jedoch keine Dekompositionsanalyse durch und stellt den Konsum in den Vordergrund.



$$(6) \quad \begin{bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_{\bar{s}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{s,s} & \mathbf{A}_{s,\bar{s}} \\ \mathbf{A}_{\bar{s},s} & \mathbf{A}_{\bar{s},\bar{s}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_{\bar{s}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{y}_s \\ \mathbf{y}_{\bar{s}} \end{bmatrix}$$

sowie anstelle von (5) die Gleichung

$$(7) \quad \begin{bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_{\bar{s}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{s,s} & \mathbf{D}_{s,\bar{s}} \\ \mathbf{D}_{\bar{s},s} & \mathbf{D}_{\bar{s},\bar{s}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{y}_s \\ \mathbf{y}_{\bar{s}} \end{bmatrix}$$

mit

$$(8) \quad \mathbf{D} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{s,s} & \mathbf{D}_{s,\bar{s}} \\ \mathbf{D}_{\bar{s},s} & \mathbf{D}_{\bar{s},\bar{s}} \end{bmatrix}.$$

Mit Hilfe dieser Blockmatrizen lassen sich unterschiedliche Indikatoren für die Produktion im aggregierten Sektor  $s$  berechnen. Der interne Indikator ("internal indicator"),

$$(9) \quad \mathbf{I}_s = \mathbf{i}' \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A}_{s,s})^{-1} \cdot \mathbf{y}_s$$

mit  $\mathbf{i}$  als Einsenvektor, weist die Vorleistungen von Sektor  $s$  aus, die er zur Produktion von den Endnachfragegütern  $\mathbf{y}_s$  benötigt. Daneben gibt es noch einen Rückwärts- und einen Vorwärts-Indikator. Der Rückwärts-Indikator ("backward indicator")

$$(10) \quad \mathbf{B}_s = \mathbf{i}' \cdot \mathbf{D}_{\bar{s},s} \cdot \mathbf{y}_s$$

setzt sich aus allen Vorprodukten der anderen Sektoren zusammen, die  $s$  für die Erstellung seiner Endnachfrage  $\mathbf{y}_s$  verwendet. Entsprechend umfasst der Vorwärts-Indikator ("forward indicator")

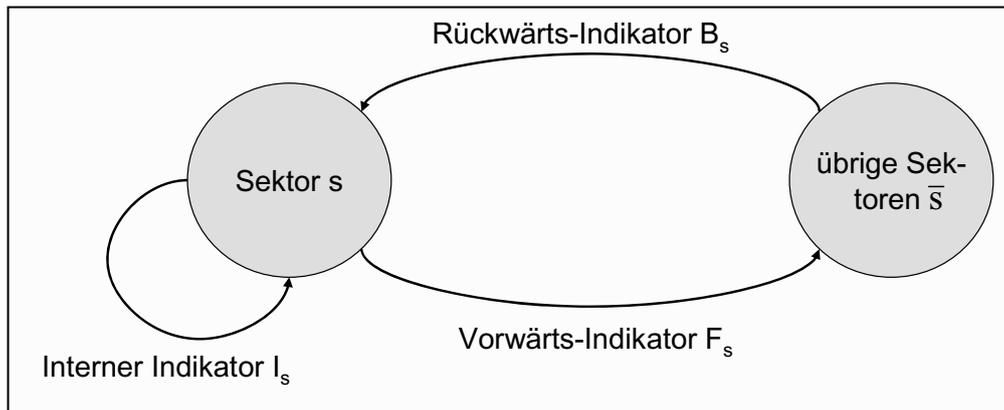
$$(11) \quad \mathbf{F}_s = \mathbf{i}' \cdot \mathbf{D}_{s,\bar{s}} \cdot \mathbf{y}_s$$

alle Vorleistungen des Sektors  $s$  zur Produktion der Endnachfrage von den übrigen aggregierten Sektoren.

Zusätzlich entsteht durch Rückwirkungen ein weiterer Output, der durch den gemischten Indikator ("mixed indicator")

$$(12) \quad \mathbf{M}_s = \mathbf{i}' \cdot [\mathbf{D}_{s,s} - (\mathbf{I} - \mathbf{A}_{s,s})^{-1}] \cdot \mathbf{y}_s$$

abgebildet wird. Dieser umfasst alle Rückwirkungen, die bei der Nachfrage nach Vorprodukten für die Produktion von  $\mathbf{y}_s$  entstehen. Eine Nachfrage nach Vorprodukten im eigenen Sektor und in anderen Sektoren führt nämlich dazu, dass durch Kreislaufprozesse ebenfalls mehr Vorleistungen vom Sektor  $s$  nachgefragt werden.

**Abb. 3: Verschiedene Indikatoren**

Insgesamt gilt, dass sich die Gesamtnachfrage nach Produkten des aggregierten Sektors  $x_s$  aus dem internen, dem vorwärtsgerichteten und dem gemischten Indikator zusammensetzt:

$$(13) \quad x_s = i' \cdot x_s = I_s + F_s + M_s.$$

Diese Gleichung zerlegt die Gesamtnachfrage nach dem Ort des Entstehens. Ein Anstieg oder ein Absinken der Gesamtnachfrage kann also:

- vom Sektor selbst (= interner Effekt bzw. "internal effect":  $I_s$ )
- von den übrigen Sektoren (Vorwärtseffekt bzw. "forward effect":  $F_s$ )
- vom Zusammenspiel zwischen dem eigenen Sektor und den übrigen Sektoren (= gemischter Effekt bzw. "mixed effect":  $M_s$ )

ausgehen. Diese Aufteilung ist Grundlage der folgenden Analysen.

Worauf lassen sich Veränderungen der Gesamtnachfrage zurückführen? Hierzu wird die auf Carter (1970) zurückgehende Dekompositionsanalyse angewendet.<sup>3</sup> Eine mathematische Herleitung ist bei Chóliz und Duarte (2006) zu finden. Dieses Verfahren differenziert Veränderungen nach Art der Einflussgrößen in einen technologischen Effekt, in einen Nachfrageeffekt und in eine Wechselwirkung zwischen beiden Effekten. Ein Sektor entwickelt sich also dann günstig, wenn:

- die Endnachfrage in jenen Sektoren besonders stark ansteigt, die bevorzugt auf Vorprodukte des betrachteten Sektors zurückgreifen (= Nachfrageeffekt)

<sup>3</sup> Zur Historie dieses Verfahrens vgl. Rose/Casler 1996.

- der betrachtete Sektor andere Vorprodukte substituiert, im Produktionsprozess der einzelnen Wirtschaftszweige also verstärkt eingesetzt wird (= technologischer Effekt)
- sich Nachfrage- und Technologieeffekt günstig beeinflussen (= Wechselwirkung).

**Tab. 1: Zerlegung der Effekte**

Art Entstehung	Nachfrageeffekt	technologischer Effekt	Wechselwirkung
intern (I <sub>s</sub> )	1.1 interner Nachfrageeffekt $\mathbf{i}' \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A}_{s,s})^{-1} \cdot \Delta \mathbf{y}_s$	1.2 interner technolog. Effekt $\mathbf{i}' \cdot \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{A}_{s,s})^{-1} \cdot \mathbf{y}_s$	1.3 interne Wechselwirkung $\mathbf{i}' \cdot \Delta(\mathbf{I} - \mathbf{A}_{s,s})^{-1} \cdot \Delta \mathbf{y}_s$
vorwärts (F <sub>s</sub> )	2.1 vorwärtsgerichteter Nachfrageeffekt $\mathbf{i}' \cdot \mathbf{D}_{s,\bar{s}} \cdot \Delta \mathbf{y}_s$	2.2 vorwärtsgerichteter technolog. Effekt $\mathbf{i}' \cdot \Delta \mathbf{D}_{s,\bar{s}} \cdot \mathbf{y}_s$	2.3 vorwärtsgerichtete Wechselwirkung $\mathbf{i}' \cdot \Delta \mathbf{D}_{s,\bar{s}} \cdot \Delta \mathbf{y}_s$
gemischt (M <sub>s</sub> )	3.1 gemischter Nachfrageeffekt $\mathbf{i}' \cdot [\mathbf{D}_{s,s} - (\mathbf{I} - \mathbf{A}_{s,s})^{-1}] \cdot \Delta \mathbf{y}_s$	3.2 gemischter technolog. Effekt $\mathbf{i}' \cdot \Delta[\mathbf{D}_{s,s} - (\mathbf{I} - \mathbf{A}_{s,s})^{-1}] \cdot \mathbf{y}_s$	3.3 gemischte Wechselwirkung $\mathbf{i}' \cdot \Delta[\mathbf{D}_{s,s} - (\mathbf{I} - \mathbf{A}_{s,s})^{-1}] \cdot \Delta \mathbf{y}_s$

Die drei Unterteilungen nach dem Ort der Entstehung und nach Art der Einflussgröße können jeweils separat analysiert werden. Beide Differenzierungen lassen sich aber auch in Kombination betrachten. Dann erhält man eine Matrix mit neun Zellen, deren Bezeichnungen und Berechnungsformeln aus Tab. 1 hervorgehen. Der technologische Effekt wird durch die Veränderung der Leontief-Koeffizienten ermittelt, während zur Berechnung des Nachfrageeffekts die Endnachfrage variiert wird. Die Wechselwirkung erhält man, indem beide Größen verändert werden.

Kommen wir zur Interpretation der genannten Effekte, für die Tab. 2 eine Auflistung enthält. Ein gestiegener interner Indikator weist auf mehr benötigte Vorleistungen aus dem eigenen Sektor hin. Hierfür kann zum einen eine gestiegene Endnachfrage, erfasst über einen positiven Nachfrageeffekt, verantwortlich sein. Möglich ist aber auch ein positiver technologischer Effekt, der einen höheren Wert der Vorleistungen aus dem eigenen Sektor impliziert. Als drittes kann noch eine Wechselwirkung beider Effekte auftreten. So ist beispielsweise denkbar, dass eine gestiegene Nachfrage nach Vorleistungen aus dem eigenen Sektor auch dazu führt, dass in bessere Verfahren investiert wird und damit diese Vorleistungen aufgrund einer besseren Qualität an Wert gewinnen. Entsprechend sind die Effekte für die übrigen zwei Indikatoren zu interpretieren. Die technologischen Effekte, Nachfrageeffekte und Wechselwirkungen lassen sich auch für alle sechs betrachteten Sektoren des Verkehrs und der Nachrichtenübermittlung aufsummieren.

**Tab. 2: Interpretation der Effekte**

Effekt	Ist positiv für einen Sektor, wenn ....
1.1 interner Nachfrageeffekt	die Endnachfrage nach den von ihm gefertigten Produkten ansteigt.
1.2 interner technolog. Effekt	zur Herstellung der eigenen Endnachfrage verstärkt auf Vorprodukte aus dem eigenen Sektor zurückgegriffen wird.
1.3 interne Wechselwirkung	sich die Effekte 1.1 und 1.2 gegenseitig begünstigen.
2.1 vorwärtsgerichteter Nachfrageeffekt	die Endnachfrage in jenen Wirtschaftszweigen ansteigt, denen der von uns betrachtete Sektor Vorprodukte zuliefert.
2.2 vorwärtsgerichteter technolog. Effekt	andere Wirtschaftszweige verstärkt auf Vorprodukte des von uns betrachteten Sektors zurückgreifen, er also in anderen Sektoren hergestellte Vorprodukte substituiert.
2.3 vorwärtsgerichtete Wechselwirkung	sich die Effekte unter 2.1 und 2.2 gegenseitig günstig beeinflussen.
3.1 gemischter Nachfrageeffekt	die Steigerung der eigenen Endnachfrage zu einer verstärkten Zwischennachfrage bei jenen Branchen führt, die wiederum in ihrem Produktionsprozess bevorzugt auf Vorprodukte des betrachteten Sektors zurückgreifen.
3.2 gemischter technolog. Effekt	die Steigerung der Zwischennachfrage zum verstärkten Einkauf von Vorprodukten in jenen Branchen führt, die wiederum im eigenen Produktionsprozess im höheren Maße Vorprodukte des betrachteten Sektors verwenden.
3.3 gemischte Wechselwirkung	sich die Effekte 3.1 und 3.2 gegenseitig begünstigen.

### 3. Empirische Analyse

Als Datenbasis dienen die Input-Output-Tabellen, die das Statistische Bundesamt (2006a, 2006b und 2006c) herausgibt. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 dargestellt. Summierte Werte sind dabei grau hinterlegt angegeben. Der interne, der vorwärtsgerichtete sowie der gemischte Nachfrageeffekt aufsummiert ergibt den Nachfrageeffekt insgesamt. Das gleiche gilt für die technologischen Effekte sowie die Wechselwirkungen zwischen beiden Effekten. Daneben ist aber auch eine Spalte vorhanden; die einzelnen Effekte für die Sektoren des Verkehrsbereichs lassen sich also auch aufaddieren.

**Tab. 3: Absolute Werte der Dekompositionsanalyse (1991-2002)**

Effekte \ Sektor s	Eisenbahn	Landverkehr	Schifffahrt	Luftfahrt	Sonstiger Verkehr	Nachrichten	Verkehr u. Nachrichten
Nachfrageeffekt $I_s$	2.458	-9.402	5.712	4.166	4.357	16.056	23.346
Nachfrageeffekt $F_s$	4.027	4.770	972	1.952	13.528	14.347	39.595
Nachfrageeffekt $M_s$	4	-19	17	7	37	20	67
Nachfrageeffekt ges.	6.489	-4.650	6.701	6.124	17.922	30.422	63.008
Techn. Effekt $I_s$	-297	-90	-93	0	-5.122	3.379	-2.223
Techn. Effekt $F_s$	-5.499	13.405	-200	2.044	17.414	5.291	32.456
Techn. Effekt $M_s$	15	179	-3	-2	179	54	423
Techn. Effekt ges.	-5.781	13.494	-296	2.042	12.471	8.724	30.655
Wechselwirkung $I_s$	-89	34	-111	0	-1.962	3.194	1.066
Wechselwirkung $F_s$	-2.234	5.543	31	745	7.848	410	12.342
Wechselwirkung $M_s$	5	-68	-4	8	50	51	43
Wechselwirkung ges.	-2.319	5.509	-84	753	5.936	3.655	13.450
Outputeffekt ges.	-1.611	14.353	6.321	8.919	36.329	42.801	107.113

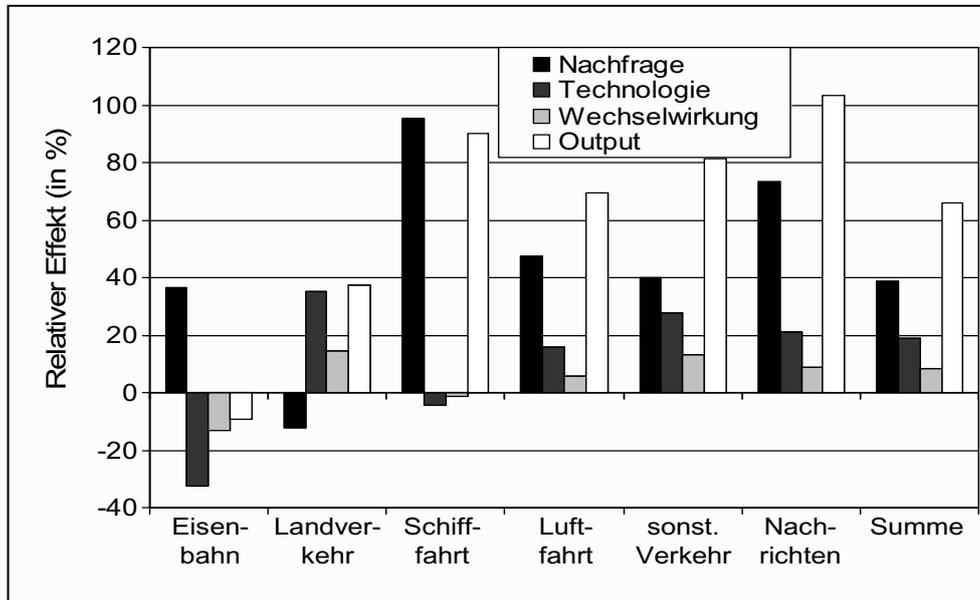
Der gesamte Outputeffekt zeigt die Veränderung der erstellten Güter und Dienstleistungen im Bereich Verkehr und Nachrichten zwischen 1991 und 2002. Hier ist ein Anstieg um 107.113 Mio. Euro vorhanden. Bezogen auf den Output 1991 – diese relativen Werte sind Tab. 4 zu entnehmen – besteht eine Erhöhung um deutliche 66 %. Die Veränderung bezogen auf den Output des jeweiligen Sektors ist dabei in allen Sektoren positiv mit Ausnahme der Eisenbahn.

Während der Output für Eisenbahnleistungen um 9,1 % gesunken ist, liegt bei den Nachrichten eine Verdoppelung des Outputs vor. Aber auch in den übrigen Sektoren des Verkehrsbereichs zeigen sich deutliche Steigerungen des Bruttoproduktionswertes. Schifffahrtsleistungen werden beispielsweise um 90 % mehr nachgefragt und sonstige Verkehrsdienstleistungen um immerhin mehr als 80 %. Diese Entwicklung deutet auf einen Strukturwandel im Verkehrsbereich zu Ungunsten der Eisenbahndienstleistungen hin.

Auf welche Effekte ist der positive Outputeffekt insgesamt zurückzuführen? Ein Vergleich der in Tab. 3 aufgeführten Effekte zeigt, dass hier vor allem der Nachfrageeffekt relevant ist (vgl. auch Abb. 4). Dieser Effekt übertrifft den technologischen Effekt um fast das Doppelte und die Wechselwirkung um das Vierfache. Am stärksten tragen zu diesem positiven Nachfrageeffekt die Nachrichtenübermittlung, gefolgt von den sonstigen Verkehrsdienstleistungen bei.

**Tab. 4: Relative Werte der Dekompositionsanalyse in Prozent (1991-2002)<sup>4</sup>**

Effekte \ Sektor s	Eisenbahn	Landverkehr	Schiffahrt	Luftfahrt	Sonstiger Verkehr	Nachrichten	Verkehr u. Nachrichten
Nachfrageeffekt $I_s$	13,8	-24,4	81,5	32,4	9,8	38,7	14,4
Nachfrageeffekt $F_s$	22,6	12,4	13,9	15,2	30,3	34,6	24,4
Nachfrageeffekt $M_s$	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Nachfrageeffekt ges.	36,5	-12,1	95,6	47,6	40,2	73,3	38,8
Techn. Effekt $I_s$	-1,7	-0,2	-1,3	0,0	-11,5	8,1	-1,4
Techn. Effekt $F_s$	-30,9	34,8	-2,9	15,9	39,0	12,7	20,0
Techn. Effekt $M_s$	0,1	0,5	0,0	0,0	0,4	0,1	0,3
Techn. Effekt ges.	-32,5	35,0	-4,2	15,9	27,9	21,0	18,9
Wechselwirkung $I_s$	-0,5	0,1	-1,6	0,0	-4,4	7,7	0,7
Wechselwirkung $F_s$	-12,6	14,4	0,4	5,8	17,6	1,0	7,6
Wechselwirkung $M_s$	0,0	-0,2	-0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Wechselwirkung ges.	-13,0	14,3	-1,2	5,9	13,3	8,8	8,3
Outputeffekt ges.	-9,1	37,2	90,1	69,3	81,4	103,1	66,0

**Abb. 4: Relative Effekte für die Sektoren (1991-2002)**

<sup>4</sup> Die in der Tabelle dargestellten relativen Werte erhält man, indem die absoluten Größen auf den Output des Basisjahres 1991 insgesamt bzw. der jeweiligen Sektoren bezogen wird.

Mit Ausnahme des Landverkehrs sind diese Nachfrageeffekte auch für alle anderen Sektoren unabhängig von der Herkunft (intern, vorwärtsgerichtet oder gemischt) positiv. Die Veränderung der Endnachfrage beim Landverkehr führt nämlich dazu, dass Landverkehrsleistungen im eigenen Sektor geringer und in anderen Sektoren stärker nachgefragt werden. Bei den übrigen Sektoren sind zwar innen- und vorwärtsgerichteter Nachfrageeffekt grundsätzlich positiv, bei einigen dominiert aber die interne Nachfrage (Schifffahrt, Luftfahrt sowie Nachrichten), bei anderen die Nachfrage von anderen Sektoren (Eisenbahn und sonstiger Verkehr).

Der gemischte Nachfrageeffekt hat bei allen Sektoren eine geringe Bedeutung. Seine relativen Werte liegen nahe bei null Prozent. Das gleiche gilt übrigens auch für den technologischen Effekt sowie die Wechselwirkung.

Der technologische Effekt soll im Folgenden näher analysiert werden. Er besitzt – wie eingangs festgestellt – eine wesentlich geringere Bedeutung als der Nachfrageeffekt (30.665 versus 63.008 Mio. Euro). Im Eisenbahn- und Schifffahrtsbereich ist er negativ, in allen übrigen betrachteten Sektoren positiv. Etwas erstaunt, dass bei der Nachrichtenübermittlung nicht der höchste technologische Effekt vorhanden ist, schließlich können andere Verkehrsleistungen mit Aufkommen der Internet-Dienste verstärkt durch Leistungen dieses Sektors substituiert werden (Baum 2000). Aber wahrscheinlich sind die Innovationszyklen im Nachrichtenbereich zu kurz und der damit einhergehende Preisverfall zu schnell, als dass für entsprechend höherwertige Nachrichtenleistungen auch wesentlich mehr Ausgaben zu tätigen sind.

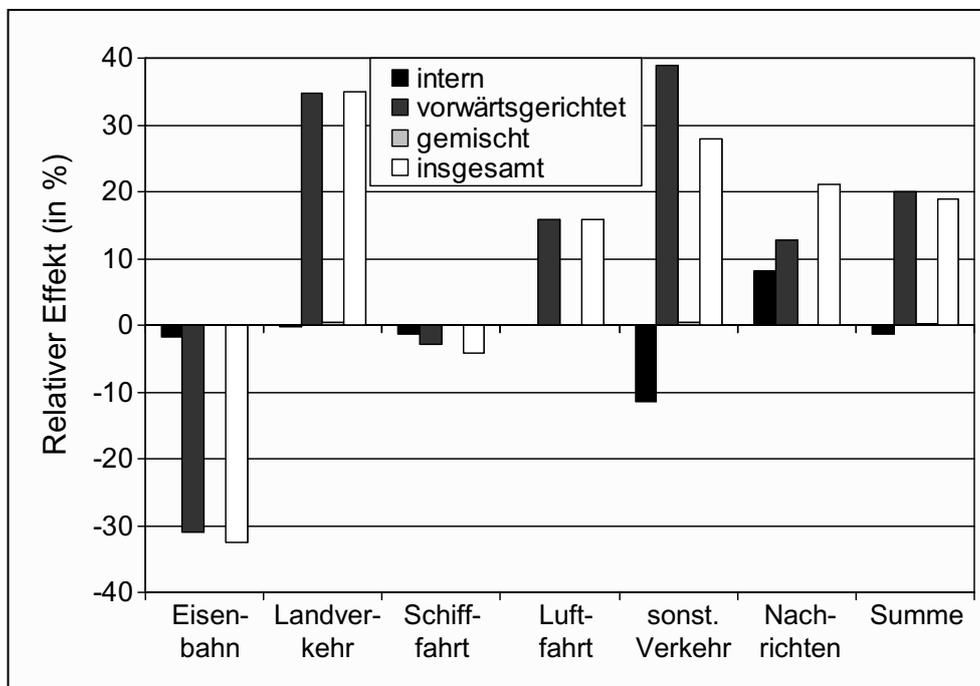
Für den internen Indikator ist sogar ein negativer technologischer Effekt für den Verkehrsbereich insgesamt vorhanden (vgl. Abb. 5). Die im eigenen Sektor produzierten Vorleistungen für Endprodukte weisen also einen gesunkenen Wert auf. Dies betrifft vor allem sonstige Verkehrsdienstleistungen, aber auch Eisenbahndienstleistungen sowie in geringem Maße den Landverkehr und die Schifffahrt. Davon weicht die Nachrichtenübermittlung ab, die einen gestiegenen technologischen Effekt besitzt.

Erhebliche Diskrepanzen im Verkehrsbereich zeigen sich aber auch für an andere Sektoren gelieferte Vorprodukte zur Erstellung von Endnachfragegütern und -dienstleistungen (technischer Effekt für den Vorwärts-Indikator  $F_3$ ). Sein Wert ist für Eisenbahndienstleistungen mit -30,9 % deutlich negativ, für sonstige Verkehrsdienstleistungen mit 39,0 % und für Landverkehrsleistungen mit 34,8 % aber erheblich positiv. Während der sonstige Verkehrsleistungs- und der Landverkehrssektor Vorprodukte mit einem höheren Wert an andere Sektoren ausliefern, ist bei dem Eisenbahndienstleistungssektor ein geringerer Wert dieser Größen festzustellen. Eisenbahndienstleistungen scheinen also in anderen Sektoren als Vorprodukte teilweise substituiert worden zu sein.

Kommen wir zur Wechselwirkung zwischen Nachfrageeffekt und technischem Effekt. Insgesamt ist festzustellen, dass die Wechselwirkung deutlich geringer ist als die beiden

übrigen Effekte. Der Eisenbahnbereich weicht hier von den übrigen Sektoren insofern ab, als sein absoluter und relativer Wert erheblich negativ sind. Die Kombination zwischen technischem Effekt und Nachfrageeffekt führt dazu, dass der Output in diesem Sektor sinkt. Die technologischen Probleme bei den Eisenbahndienstleistungen werden durch die Wechselwirkung noch verstärkt. Oder anders ausgedrückt: Der Nachfrageeffekt wiegt zwar den negativen technologischen Effekt auf, durch die negative Wechselwirkung ist jedoch der Output des Eisenbahnsektors gesunken. Insbesondere bei den an andere Sektoren gelieferten Leistungen ist eine negative Wechselwirkung festzustellen.

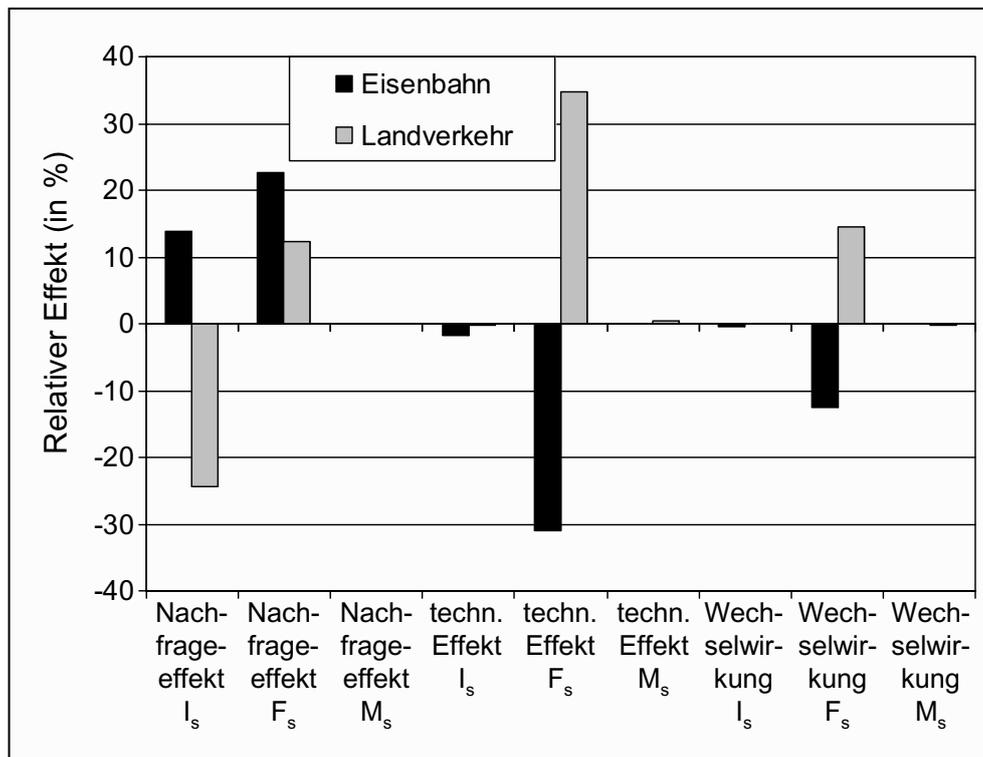
**Abb. 5: Relative technologische Effekte für die Sektoren (1991-2002)**



Bei der Schifffahrt ist auch eine negative Wechselwirkung vorhanden, die allerdings wesentlich geringer als bei der Eisenbahn ist. Alle übrigen Sektoren profitieren von einer positiven gegenseitigen Beeinflussung von Nachfrage und Technologie. Insbesondere beim Landverkehr und beim sonstigen Verkehr ist die Wechselwirkung relativ stark ausgeprägt. Dabei schlägt besonders die vorwärtsgerichtete Wechselwirkung durch. In diesen beiden Sektoren führt offenbar eine gesteigerte Nachfrage zu Innovationen, so dass andere Sektoren eine Substitution durch von ihnen produzierte Leistungen durchführen.

Mit Hilfe der Berechnungen lassen sich für jeden Sektor Verkehrsprofile erstellen, die zeigen, wo die Stärken und Schwächen der einzelnen Sektoren liegen. Hierfür werden die unterschiedlichen Effekte für einige Sektoren auf der x-Achse abgetragen. Abb. 6 enthält eine solche Aufstellung für die Eisenbahn und den Landverkehr, die sich in ihrem Profil von den anderen Sektoren abheben. Aus der Grafik geht hervor, dass beide Sektoren recht unterschiedliche Profile aufweisen. Die Stärken der Eisenbahn liegen beim internen und vorwärtsgerichteten Nachfrageeffekt, die Schwächen sind beim vorwärtsgerichteten technologischen Effekt und der vorwärtsgerichteten Wechselwirkung zu finden. Der Landverkehr besitzt eine Schwäche bei der internen Nachfrage, aber Stärken beim vorwärtsgerichteten technologischen Effekt und der entsprechenden Wechselwirkung.

**Abb. 6:** Vergleich der relativen Effekte für die Eisenbahn und den Landverkehr (1991-2002)



Zusätzlich führen wir eine Analyse für den Zeitraum zwischen 2000 und 2002 durch (vgl. Tab. 5). Mit dieser kurzfristigen Betrachtung lässt sich herausfinden, ob die für den Gesamtzeitraum von 1991 bis 2002 diagnostizierten Tendenzen für den Verkehrssektor auch in jüngster Zeit fortbestehen.

**Tab. 5: Absolute Werte der Dekompositionsanalyse (2000-2002)**

Effekte \ Sektor s	Eisenbahn	Landverkehr	Schifffahrt	Luftfahrt	Sonstiger Verkehr	Nachrichten	Verkehr u. Nachrichten
Nachfrageeffekt $I_s$	-1.107	-16.812	475	845	-1.163	5.460	-12.303
Nachfrageeffekt $F_s$	754	247	73	523	-1.170	3.662	4.088
Nachfrageeffekt $M_s$	-2	-34	1	1	-10	7	-36
Nachfrageeffekt ges.	-355	-16.599	549	1.369	-2.343	9.128	-8.251
Techn. Effekt $I_s$	-3	-139	-4	0	-3.975	102	-4.019
Techn. Effekt $F_s$	988	11.937	-251	-1.299	11.624	452	23.451
Techn. Effekt $M_s$	22	182	1	-9	162	32	390
Techn. Effekt ges.	1.007	11.979	-254	-1.309	7.811	586	19.821
Wechselwirkung $I_s$	39	19	-14	0	-1.405	1.150	-211
Wechselwirkung $F_s$	30	5.142	3	-590	5.671	-1.244	9.013
Wechselwirkung $M_s$	8	-67	1	7	57	38	43
Wechselwirkung ges.	77	5.094	-10	-583	4.323	-57	8.844
Outputeffekt ges.	729	475	285	-523	9.791	9.657	20.414

**Tab. 6: Relative Werte der Dekompositionsanalyse (2000-2002)**

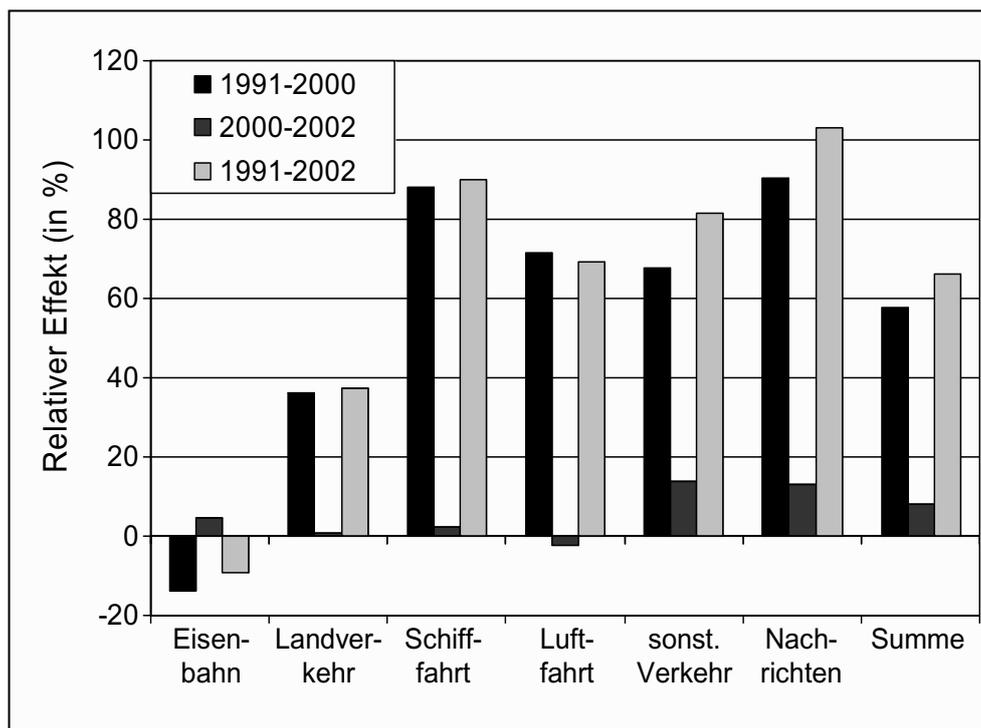
Effekte \ Sektor s	Eisenbahn	Landverkehr	Schifffahrt	Luftfahrt	Sonstiger Verkehr	Nachrichten	Verkehr u. Nachrichten
Nachfrageeffekt $I_s$	-7,2	-32,1	3,6	3,8	-1,6	7,3	-4,9
Nachfrageeffekt $F_s$	4,9	0,5	0,6	2,3	-1,6	4,9	1,6
Nachfrageeffekt $M_s$	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nachfrageeffekt ges.	-2,3	-31,7	4,2	6,1	-3,3	12,2	-3,3
Techn. Effekt $I_s$	0,0	-0,3	0,0	0,0	-5,6	0,1	-1,6
Techn. Effekt $F_s$	6,4	22,8	-1,9	-5,8	16,3	0,6	9,4
Techn. Effekt $M_s$	0,1	0,3	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2
Techn. Effekt ges.	6,5	22,8	-1,9	-5,9	11,0	0,8	8,0
Wechselwirkung $I_s$	0,3	0,0	-0,1	0,0	-2,0	1,5	-0,1
Wechselwirkung $F_s$	0,2	9,8	0,0	-2,6	8,0	-1,7	3,6
Wechselwirkung $M_s$	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Wechselwirkung ges.	0,5	9,7	-0,1	-2,6	6,1	-0,1	3,5
Outputeffekt ges.	4,7	0,9	2,2	-2,3	13,8	12,9	8,2

Insgesamt kann festgestellt werden, dass der Output des Verkehrssektors auch zwischen 2000 und 2002 gewachsen ist (um 20.414 Mio. Euro oder 8,2 %). Im Vergleich zur gesamten Untersuchungsperiode zwischen 1991 und 2002 fällt auf, dass der Eisenbahnbereich in jüngster Zeit eine positive und der Luftfahrtsektor eine negative Entwicklung aufweisen.

Insbesondere ist anzumerken, dass der technologische Effekt jetzt nicht mehr bei der Eisenbahn negativ ist, was auf einen positiven technologischen Effekt zurückzuführen ist. Während in den neunziger Jahren Eisenbahndienstleistungen als Vorleistungen in anderen Sektoren erheblich an Wert verloren haben, ist zwischen 2000 und 2002 eine gegenläufige Tendenz festzustellen. Die kontinuierliche Nachfrage der Eisenbahn als Vorleistungen in anderen Sektoren hat offenbar zu Innovationen geführt, die diese Wertsteigerung in jüngster Zeit begründen.

Ein Strukturbruch in der Zeitreihe zeigt sich aber auch bei der Luftfahrt. Diese Entwicklung lässt sich möglicherweise mit den Terroranschlägen am 11.09.2001 in den USA begründen. Der Nachfrageeffekt weist zwar immer noch einen positiven Wert auf, beim technologischen Effekt sowie den Wechselwirkungen zwischen beiden Effekten ist allerdings für die Luftfahrtleistungen eine rückläufige Tendenz festzustellen. Insbesondere der Vorwärts-Indikator für die Technologie zeigt an, dass Luftfahrtleistungen, die an andere Sektoren geliefert werden, einen geringeren Wert besitzen und teilweise substituiert werden.

**Abb. 7: Relative Effekte für die Sektoren in Unterperioden**



Im Vergleich zum Gesamtzeitraum fällt aber auch auf, dass der Nachfrageeffekt für den Verkehrsbereich insgesamt in jüngster Zeit einen negativen Wert aufweist. Hierfür sind die stark negativen Nachfrageeffekte für Landverkehrsleistungen verantwortlich. Der Landverkehr benötigt seine Leistungen im wesentlich geringeren Ausmaß als Vorprodukte im eigenen Sektor. Möglicherweise werden Aufträge im Landverkehr eher an Speditionen in anderen europäischen Ländern vergeben, die besonders bei den Stundenlöhnen erhebliche Kostenvorteile aufweisen (Otremba 2004). Der stark wachsende Sektor für Nachrichtenübermittlung kann diese negativen Werte nicht aufwiegen.

#### 4. Resümee

Die Input-Output-Analyse ist ein klassisches Verfahren zur Untersuchung der Beziehungen zwischen Sektoren einer Volkswirtschaft. Durch die Verknüpfung dieser Methode mit der Dekompositionsanalyse lassen sich in dieses Modell Nachfrageeffekte, technische Effekte und eine Wechselwirkung zwischen beiden Effekten einbeziehen. Damit können differenzierte Untersuchungen für Lieferbeziehungen auch für einzelne volkswirtschaftliche Bereiche angewendet werden. Wir haben eine solche Analyse erstmalig für den Verkehrsbereich in Deutschland durchgeführt.

Die Analyse zeigt, dass insgesamt im Zeitraum zwischen 1991 und 2002 ein deutlich positiver Outputeffekt (sowohl absolut als auch relativ) vorhanden ist. Insbesondere der Sektor der Nachrichtenübermittlung weist ein hohes Wachstum in der Nachfrage auf. Da dieser Bereich kurze Innovationszyklen besitzt, ist hier kein gestiegener Wert der Leistungen in Form eines relativ hohen technologischen Effektes festzustellen.

Ein Strukturbruch zeigt sich bei den Eisenbahn- und den Luftfahrtleistungen. Der Anfang der neunziger Jahre negative Outputeffekt für die Eisenbahn besteht in jüngster Zeit nicht mehr fort. Andere Sektoren fragen sogar verstärkt Eisenbahndienstleistungen nach. In der Luftfahrt zeigt sich zwischen 2000 und 2002 ein negativer technologischer Effekt, der wahrscheinlich mit den Terroranschlägen 2001 in den USA zusammenhängt.

Etwas bedenklich mutet allerdings der negative Nachfrageeffekt für die Periode 2000 bis 2002 an. Hier ist insbesondere der Landverkehr verantwortlich, der seine eigenen Leistungen als Vorprodukte im wesentlich geringeren Ausmaß nachfragt. Möglicherweise werden Subaufträge eher an Speditionen anderer europäischer Länder vergeben.

Insgesamt ist festzustellen, dass es sich hier nur um eine erste Analyse für Deutschland handelt. Die untersuchten Sektoren sind aggregiert; interessant wäre die Durchführung einer Input-Output-Analyse gekoppelt mit einer Dekompositionsanalyse in weiter differenzierter sektoraler Form. Diese sektorale Aufschlüsselung ist allerdings nicht in den vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Input-Output-Tabellen vorhanden.

## Abstract

The objective of the paper is to analyse the technological effects and the demand effects in six sectors of the traffic and telecommunication segment from 1991 to 2002. Altogether there is a positive output effect, which continues to the end of the examined period. This can be attributed particularly to a positive demand effect in most sectors. The technological effect is negative for railway services over the whole period, which suggests a structural change. In recent time this trend does not continue. For aviation services only a negative technological effect can be found for the period from 2000 to 2002. However, the value of goods and services demanded by other sectors has declined. Possibly this development stands in line with the terror attacks at 11.09.2001 in the USA.

## Literatur

- Baum, H.: Beschäftigungseffekte des Verkehrs. In: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 70, 1999, S. 131-154.
- Baum, H.: Transport Intensity, Decoupling and Economic Growth. In: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 71, 2000, S. 77-101.
- Carter, A.P.: Structural Change in the American Economy, Cambridge 1970.
- Chóliz, J. S., Duarte, R.: The Effect of Structural Change on the Self-Reliance and Interdependence of Aggregate Sectors. The Case of Spain, 1980–1994. In: Structural Change and Economic Dynamics, 17, 2006, S. 27-45.
- Delucchi, M., Hsu, S.-L.: The External Damage Cost of Noise Emitted from Motor Vehicles. In: Journal of Transportation and Statistics, 3, 1998, S. 1-24.
- Diekmann, A.: Mobilität und Wachstum. In: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 58, 2006, S. 72-78.
- Diekmann, A.: Konsum und Verkehr. Mobilität im Rückzug. In: Internationales Verkehrswesen, 74, 2003, S. 1-24.
- Harris, J.: The Importance of Transportation in the Canadian Economy. In: Journal of Transportation and Statistics, 6, 2003, S. 29-50.
- Leontief, W.: Input-Output Economics, New York 1986.
- Otremba, M.: Internationale Wettbewerbsfähigkeit im Strassengüterverkehr. Eine Untersuchung zur künftigen Wettbewerbsposition deutscher Strassengüterverkehrsunternehmen nach der EU-Osterweiterung, Diss., Hamburg 2004.
- Rose, A., Casler, S.: Input-Output Structural Decomposition Analysis. A Critical Appraisal. In: Economic Systems Research, 8, 1996, S. 33-62.
- Sánchez, C., Duarte, R.: Production Chains and Linkage Indicators. In: Economic Systems Research, 15, 2003, S. 481-494.
- Skolka J.: Input-Output Structural Decomposition Analysis for Austria. In: Journal of Policy Modelling, 11, 1989, S. 45-66.

- Stäglich, R.: Input-Output-Analyse. In: Spektrum der Wissenschaft, o. Jg., 1985, S. 44-64.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.): VGR des Bundes. Input-Output-Rechnung 2000 (Fachserie 18, Reihe 2), Wiesbaden 2006a.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.): VGR des Bundes. Input-Output-Rechnung 2002 (Fachserie 18, Reihe 2), Wiesbaden 2006b.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.): VGR des Bundes. Input-Output-Rechnung 1991-2000. Ergebnisse vor der Revision 2005 (Fachserie 18, Reihe 2), Wiesbaden 2006c.
- Tight, M. R., Delle Site, P., Meyer-Rühle, O.: Decoupling Transport from Economic Growth. Towards Transport Sustainability in Europe. In: European Journal of Transport and Infrastructure Research, 4, 2004, S. 381-404.
- Weiß, J.-P.: Zielsetzung und Methoden des Arbeitskreises. In: J.-P. Weiß (Hrsg.), Wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands bis zum Jahr 2000. Szenarien und Input-Output-Analysen, Wiesbaden 1993, S. 1-33.

## Die Modellierung innerstädtischer Staus und die Wirkungsweise ausgewählter wirtschaftspolitischer Maßnahmen – eine spieltheoretische Analyse

VON TORSTEN MARNER, MÜNSTER

### 1. Problemstellung und Gang der Untersuchung

Staus gelten gemeinhin als eines der zentralen Probleme innerstädtischen Verkehrs. Durch eine ineffiziente Nutzung des knappen Gutes Straßenraum kommt es zu einer systematischen Übersteigerung der Kapazität des Straßenraumes durch die Verkehrsmenge, so dass es zu Überlastungserscheinungen mit den bekannten Folgen wie Zeitverlusten für die Verkehrsteilnehmer und Umweltbeeinträchtigungen kommt und dadurch bedeutende Wohlfahrtsverluste für die Gesamtwirtschaft erzeugt werden. Kapitel 2 geht diesbezüglich auf die Relevanz innerstädtischer Staus ein. Staus sind als Folge des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern modellierbar, die bei beschränkter innerstädtischer Straßenraumkapazität vor der Entscheidung stehen, etwa von einem Punkt A außerhalb der Innenstadt zu einem innerstädtischen Punkt B zu gelangen. Mögliche Alternativen seien dabei zum einen die Nutzung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und zum anderen als relevantestes Beispiel alternativer Nutzung der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV).

Unter der neoklassischen Annahme individuell rationalen Verhaltens der Verkehrsteilnehmer ist innerstädtischer Verkehr als stabiler gleichgewichtiger Stauzustand darstellbar. Problematisch ist dies, da die Akteure aus individueller Sicht trotz drohenden Staus keinen Anreiz zu einer Verhaltensänderung haben. Dies begründet dann eine unerwünschte Dilemmasituation, wenn kooperatives Verhalten der Verkehrsteilnehmer – wie der Verzicht auf die Nutzung des Autos – zu einem besseren Ergebnis führen würde als individuell rationales Verhalten. Kapitel 3 modelliert diese innerstädtische Problematik mithilfe eines einfachen spieltheoretischen Ansatzes, bei dem gezeigt wird, warum unter den betrachteten Rahmenbedingungen Stau in Innenstädten entsteht und zudem als gleichgewichtiger Zustand zu verstehen ist, bevor Kapitel 4 aufzeigt, dass dieses Gleichgewicht die Existenz eines n-Personen-Gefangenendilemmas impliziert.

Eine Dilemmasituation dient als Rechtfertigung eines externen Eingriffs, wenn dieser – bei vertretbaren Kosten der Realisierung – die Auszahlungsstrukturen der Akteure so verän-

---

*Anschrift des Verfassers:*

Diplom-Volksw. Torsten Marner  
Universität Münster  
Institut für Verkehrswissenschaft  
Am Stadtgraben 9  
48143 Münster  
e-mail: 10toma@wiwi.uni-muenster.de

dern kann, dass es nach dem Eingriff für die Verkehrsteilnehmer individuell rational wäre, sich eher kooperativ zu verhalten und auf dem Weg in die Innenstadt auf das Auto zu verzichten, um Verkehrsmenge und Staukosten zu mindern. Kapitel 5 zeigt daher exemplarisch die Wirkungsweise dreier aktuell diskutierter Maßnahmen auf das Nutzerverhalten als Beispiele möglicher externer Eingriffe: Kapazitätserweiterungen, eine Einführung von Straßenbenutzungsgebühren und eine Erhöhung der Attraktivität des ÖPNV in Form von etwa der Steigerung der Kapazität oder der Einführung von Busspurenssystemen. Kapitel 6 schließt mit einem Fazit.

## 2. Relevanz innerstädtischer Staus

Staus entstehen, wenn als Folge eines Übersteigens der Kapazität des Straßenraums durch das Verkehrsaufkommen der tatsächliche Verkehrsfluss auf einer Strecke niedriger ist als die mögliche Geschwindigkeit. Dies führt zu längeren Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer und somit zu Zeitverlusten für die betroffenen Akteure, welche diese im Stau verlorene Zeit nicht einer produktiveren Verwendung zukommen lassen können. Folglich entstehen Opportunitätskosten der Zeit, die als zentraler Bestandteil von Staukosten zu verstehen sind und bedeutende Wohlfahrtsverluste erzeugen. Staukosten lassen sich differenzieren in zusätzliche, staubedingte Zeitkosten, die durch zusätzliche Reisezeiten entstehen, zusätzliche Treibstoffkosten und zusätzliche Betriebskosten. Die höchste Relevanz entfällt hierbei auf die Zeitkosten, denen etwa 90% der Staukosten zuzurechnen sind, und auf die sich die weiteren Ausführungen konzentrieren.<sup>1</sup>

Um die Opportunitätskosten der Zeit zu ermitteln, bedarf es einer monetarisierten Bewertung der aufgrund der verlorenen Zeit entstehenden Produktivitätsverluste. Die Zeitverluste werden auf Basis so genannter speed-flow-Modelle berechnet, während die Produktivitätsverluste aus den durchschnittlichen Arbeitsstundenwerten abgeleitet werden.<sup>2</sup> Die Transformation in Staukosten erfolgt in der wissenschaftlichen Literatur durch Anwendung verschiedener Methoden, die stark unterschiedliche Schätzungen implizieren. Während etwa INFRAS/IWW (2004) in Abhängigkeit der Bewertungsmethode von jährlichen Staukosten in Deutschland in Höhe von 16,35 Mrd. € (bei Berücksichtigung der staubedingten Wohlfahrtsverluste durch eine ineffiziente Nutzung der Straßen im Vergleich zu einer optimalen Verkehrssituation), 65,38 Mrd. € (bei Berücksichtigung der Zeitverluste) oder gar 193,46 Mrd. € (bei Berücksichtigung der Gebührensumme, die erhoben werden müsste, um eine vollständige Internalisierung der Staukosten zu erreichen) ausgeht,<sup>3</sup> belaufen sich alternati-

---

<sup>1</sup> Vgl. Link et al. (1999), S. 9 ff.

<sup>2</sup> Hier wird in der Literatur gerne der Begriff des „value of time“ benutzt. Dieser ist der als in monetären Einheiten ausgedrückte Wert der Fahrzeit zu verstehen, der sich an angenommenen durchschnittlichen Arbeitsproduktivitäten und am durch Verkehrsdichte und Geschwindigkeit determinierten Verkehrsfluss orientiert. Vgl. dazu beginnend mit Beesley (1965), Oort (1969), Vickrey (1969) oder aus der Fülle moderner Literatur Brownstone/Small (2005) und Calfee/Winston (1998).

<sup>3</sup> Vgl. INFRAS/IWW (2004), S. 119 ff., 153.

ve Schätzungen etwa im Rahmen des UNITE-Projekts auf Staukosten in Deutschland (für das Jahr 1998) in Höhe von lediglich 17,4 Mrd. €<sup>4</sup> oder im Rahmen der „BMW-Studie“ auf ca. 100 Mrd. €.<sup>5</sup> Die Schätzungen aus letzterer Studie sind allerdings aufgrund des recht hoch gewählten „values of time“ der Akteure umstritten. Trotz der unterschiedlichen Schätzhöhen ist allen Schätzungen eine signifikante ökonomische Bedeutung der Staukosten gemein.<sup>6</sup>

Die Relevanz gerade der innerstädtischen Staus, der nicht zuletzt auf einen höheren Grad der Betroffenheit zurückzuführen ist, zeigt sich nicht nur am bedeutenden Anteil innerstädtischer Staukosten. Basierend auf INFRAS/IWW (2004) beträgt dieser Anteil in Abhängigkeit der gewählten Methodik zwischen 26% und 32% der gesamten Staukosten.<sup>7</sup> Darüber hinaus offenbart ein Vergleich von Schätzungen externer Staugrenzkosten (MCC)<sup>8</sup> von innerstädtischem und überörtlichem Verkehr die hohe Bedeutung innerstädtischer Staus. Sansom et al. (2001) zeigen in einer Untersuchung externer Grenzkosten des britischen Verkehrs signifikant höhere MCC im innerstädtischen Bereich auf. So betragen diese – allerdings zeitlich noch vor der mit Einführung der London City Congestion Charge eintretenden signifikanten Verkehrsberuhigung<sup>9</sup> – etwa im hoch staubelasteten Central London während der Hauptverkehrszeit ca. 86 pence pro Fahrzeugkilometer (p./Fzkm.) und außerhalb der Hauptverkehrszeit ca. 47 p./Fzkm. Außerhalb des inneren Londoner Zentrums sinken diese Kosten auf ca. 23 p./Fzkm. (im peak) bzw. ca. 12 p./Fzkm. (im off-peak), während die außerörtlichen externen Staugrenzkosten auf den Hauptstraßen bei ca. 9 p./Fzkm und auf sonstigen überörtlichen Straßen auf lediglich ca. 2 p./Fzkm. geschätzt werden.<sup>10</sup> Diese Studie bestätigt tendenziell die Ergebnisse von Newbery (1990), der die MCC auf britischen Autobahnen auf 0,39 p./Fzkm, auf außerörtlichen Hauptverbindungen auf 0,29 p./Fzkm. und auf anderen außerörtlichen Verbindungen auf 0,07 p./Fzkm. schätzt, während die innerstädtischen MCC deutlich höher liegen. So werden für Central London MCC in Höhe von 55,12 p./Fzkm. (peak) bzw. 44,30 p./Fzkm geschätzt, während selbst in britischen Kleinstädten die MCC noch 10,45 p./Fzkm. (peak) bzw. 6,37 p./Fzkm. betragen.<sup>11</sup> Auch die europaweite Studie von INFRAS/IWW (2004) bestätigt die Relevanz gerade innerstädtischer Staukosten. Bezogen auf den Pkw-Verkehr werden hier für den Staufall

<sup>4</sup> Vgl. Link (2002).

<sup>5</sup> Vgl. Frank/Sumpf (1997).

<sup>6</sup> Einen Überblick zu internationalen Staukostenschätzungen bieten Krause (2003), S. 46 ff. oder auch Kossak (2004), S. 536 ff.

<sup>7</sup> Eigene Berechnungen nach INFRAS/IWW (2004), S. 153.

<sup>8</sup> Zu der gerade an dieser Stelle relevanten Diskussion über den Grad der Externalität von Staukosten vgl. INFRAS/IWW (2004), S. 119 ff.

<sup>9</sup> Vgl. zur London City Congestion Charge etwa Transport for London (2004, 2006), Santos, G./Bhakar, J. (2006), Prud'homme, R./Bocajero, J.P. (2005) sowie aus der deutschen Literatur Marner (2004), S. 87 ff. und Eichinger/Knorr (2004), S. 366 ff.

<sup>10</sup> Vgl. Sansom et al. (2001), S. 25 ff.

<sup>11</sup> Vgl. Newbery (1990).

innerstädtische MCC in Höhe von 3096 €/Fzkm. gegenüber lediglich 1951 €/Fzkm. auf Landstraßen ermittelt.<sup>12</sup>

### 3. Modellierung innerstädtischen Verkehrs

Diese – in ihrer Höhe wohlfahrtstheoretisch unerwünschten – innerstädtischen Staus sind als logische Folge individuell rationalen Verhaltens der Verkehrsteilnehmer zu verstehen. Ein derartiges Verhalten der Akteure bedeutet, dass diese, wenn sie zwischen verschiedenen Alternativen wählen können, stets die Alternative wählen, von der sie sich den höchsten Nutzen versprechen.<sup>13</sup>

Folgendes spieltheoretisches Modell zeigt auf, dass bei – wie gerade in großen Innenstädten üblichen – begrenzten Straßenkapazitäten unter bestimmten Voraussetzungen ein stabiles Gleichgewicht besteht, in dem die tatsächlich realisierte Verkehrsmenge die Kapazität der Straße übersteigt, in dem also ein Stauzustand besteht.<sup>14</sup> Um dies zu zeigen, wird – mit Hilfe von Abbildung 1 – die Entscheidung von Verkehrsteilnehmern analysiert, die zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgehend von einem außerhalb der Innenstadt liegenden Startpunkt A auf einer bestimmten Strecke einen Ort B in der Innenstadt erreichen wollen. Vereinfachend sei angenommen, dass sie von A nach B entweder durch Nutzung des MIV oder alternativ durch Nutzung des ÖPNV (in Form öffentlicher Busse oder öffentlichen schienengebundenen Verkehrs wie Straßenbahnen oder U-Bahnen) gelangen können.<sup>15</sup>

Abbildung 1 zeigt den Nutzen eines bestimmten Verkehrsteilnehmers auf seinem Weg in die Innenstadt in seiner Rolle als entweder ÖPNV-Nutzer oder als Autofahrer bei gegebenen Verkehrsverteilungen.<sup>16</sup> Auf der Ordinate ist der Nutzen in der jeweiligen Rolle des Akteurs abgetragen. Auf der Abszisse ist der Anteil  $\alpha$  der zum betrachteten Zeitpunkt die definierte Route AB wählenden Verkehrsteilnehmer dargestellt, der den MIV nutzt, um die Innenstadt zu erreichen. Die Kurven sind somit als graphische Darstellung der Nutzen des jeweiligen Akteurs zu verstehen, die abhängig von a) der aus dem Anteil der Autonutzer  $\alpha$

---

<sup>12</sup> Vgl. INFRAS/IWW (2004), S. Für weitere Untersuchungen bezüglich externer Staugrenzkosten vgl. einen Überblick bei Schrage (2005), S. 31 ff. oder etwa Mayeres et al. (1996).

<sup>13</sup> Dies entspricht im Grunde der Definition eingeschränkt rationalen Verhaltens, welches den kognitiven Schranken menschlichen Verhaltens Rechnung trägt. Vgl. zu eingeschränkt rationalem Verhalten Simon (1957) oder aus der moderneren Literatur Selten (2001).

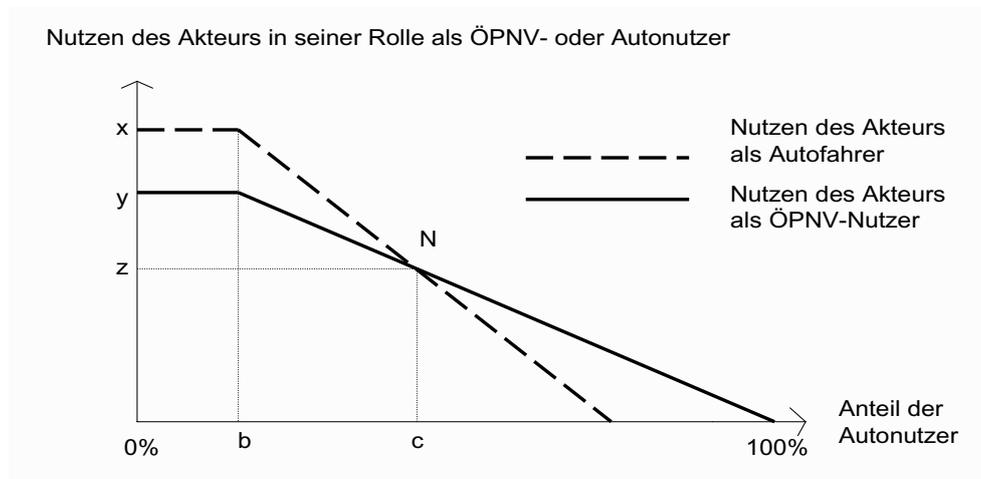
<sup>14</sup> Vgl. zur Spieltheorie binärer Entscheidungen im Straßenverkehr McCain (2003) oder detailliert zu dieser konkreten Problematik Marner (2004), S. 65 ff. Vgl. zur Anwendbarkeit der nicht-kooperativen Spieltheorie für den Transportsektor Hollander/Prashker (2006), die zudem einen Überblick über relevante spieltheoretische verkehrswissenschaftliche Untersuchungen bieten.

<sup>15</sup> Weitere denkbare Alternativen wie die Nutzung des Fahrrads oder der Fußverkehr seien ausgeschlossen, da sie a) als nicht relevant erscheinen und b) die Kernaussagen des Modells nicht beeinträchtigen würden.

<sup>16</sup> Das Modell setzt eine gegebene Verkehrsverteilung einer hinreichend großen Anzahl an Fahrzeugen voraus, da ansonsten – insbesondere wenn nur ein Fahrzeug auf der Strecke ist – ein hoher Anteil der Autonutzer einen Zustand unterhalb der Kapazitätsgrenze generieren würde. Diese Annahme ist allerdings unkritisch, da bei ihrer Verletzung ohnehin keine ökonomische Problematik bestehen würde.

abhängigen Verkehrsdichte und b) der eigenen Wahl des Verkehrsträgers (ÖPNV, MIV) sind. Die durchgezogene Kurve dokumentiert den Nutzen des ÖPNV-Akteurs. So wäre sein Nutzen  $y$ , wenn der Anteil an Autonutzern  $\alpha = b$  (oder z.B. auch 0) ist. Die gestrichelte Kurve zeigt hingegen den Nutzen des Verkehrsteilnehmers in seiner Rolle als Autonutzer. Würde er bei  $\alpha$  in Höhe von  $b$  (oder z.B. auch 0) das Auto nutzen, wäre sein Nutzen  $x$ .

**Abbildung 1: Gleichgewicht im Stau**



Quelle: Eigene Darstellung

Es besteht eine annähernd perfekte Korrelation zwischen  $\alpha$  und der Verkehrsdichte.<sup>17</sup> Je niedriger der Anteil der Autonutzer auf der Strecke ist, desto mehr Akteure nutzen den ÖPNV. Dies hat zur Folge, dass weniger Fahrzeuge benötigt werden, um die (fixe Anzahl der) Verkehrsteilnehmer zu transportieren. Dann wird aufgrund der höheren Kapazitäten von Bussen oder Bahnen eine bestimmte Anzahl an Autos durch einen Bus oder eine Bahn substituiert. So werden etwa durch einen Gelenkbus genauso viele Passagiere befördert wie durch 74 Pkw.<sup>18</sup> Zwar beträgt die so genannte „passenger car unit“ (PCU) eines Busses je nach Länge 2,5-3,<sup>19</sup> was bedeutet, dass ein Bus etwa den 2,5-3 fachen Straßenraum eines Pkw benötigt, doch würde der Gesamteffekt einer Substitution von Autos durch einen Bus eine 25-30 fache Straßenraumentlastung bewirken. Unabhängig von der genauen Größenordnung sinkt somit folglich die Verkehrsdichte deutlich, so dass  $\alpha$  auf der Abszisse durchaus als Verkehrsdichte interpretiert werden kann. Diesem Gedanken folgend, sei (im modellierten binären Entscheidungsproblem) die Strategie jedes Akteurs, den ÖPNV zu nutzen, um auf der betrachteten Strecke in die Innenstadt zu gelangen, im Folgenden auch als

<sup>17</sup> Vgl. Bauriedl/Winkler (2004), S. 29.

<sup>18</sup> Vgl. Verkehrsbetriebe STI (2006), S. 2.

<sup>19</sup> Vgl. zu den PCU factors Transport Research Laboratory (1996), S. 18.

kooperative Strategie K definiert, während die Wahl des MIV im Folgenden auch als defektierende, weil staufördernde Strategie D bezeichnet werden mag.

Punkt  $b$  ist in Abbildung 1 als Kapazitätsgrenze der betrachteten Straße zu verstehen. Bis zu einem  $\alpha \leq b$  reicht die Kapazität der Straße aus, um die Verkehrsmenge ohne Reisezeitverluste zu bewältigen. Falls  $\alpha > b$  ist, übersteigt die Nachfrage nach Nutzung des Straßenraums die Kapazitätsgrenze, so dass Stauungen auftreten. Den Akteuren entstehen ab  $\alpha > b$  somit Opportunitätskosten der Zeit. Die Graphen der Nutzenfunktionen für MIV und ÖPNV verlaufen bis  $\alpha \leq b$  parallel. Gleichwohl ist der Nutzen des MIV-Akteurs in diesem Bereich höher als der des ÖPNV-Nutzers. Grundlage dieser Annahme sind zwei Gruppen von Argumenten: a) kognitiv-rationale Argumente, die dem Abwägen wahrgenommener Kosten und Nutzen Rechnung tragen und b) emotionale Argumente, die Aspekte wie etwa Ansehen und Gefühl der Akteure Rechnung tragen.<sup>20</sup> Zu den kognitiv-rationalen Gründen eines höheren Nutzens des MIV im Nicht-Stau-Fall zählen höhere Flexibilität, Unabhängigkeit, Zuverlässigkeit, Erreichbarkeit, Geschwindigkeit, Komfort und Überlegenheit des Autos durch einfachere Möglichkeit der Nutzung als Transportmittel.<sup>21</sup> Zu den emotionalen Aspekten zählen Sensationslust, Machtgefühl, Überlegenheitsgefühl, Spaß am Autofahren, Freiheitsgefühl, Wahrung der Privatsphäre etc.,<sup>22</sup> die dem Auto tendenziell einen höheren Nutzen zuordnen.

Ab  $\alpha > b$  endet die Parallelität des Verlaufs der Graphen der Nutzenfunktionen. Ab diesem Punkt erzeugt der eintretende Stauzustand unterschiedliche Nutzenreaktionen. Zwar sinkt bei Stau sowohl der Nutzen des MIV- als auch des ÖPNV-Nutzers, doch fällt die Nutzenminderung im MIV-Bereich aus folgenden Gründen stärker aus als im ÖPNV-Fall: Erstens hat der Autofahrer keine Chance, dem Stau auf der Strecke so zu entkommen, wie es vielerorts den Bussen vorbehalten ist, indem diese den drohenden Zeitverlusten durch die Nutzung von staufreien Busspuren auszuweichen in der Lage sind. Zweitens besteht für den schienengebundenen Verkehr als einem Teil des ÖPNV-Verkehrs keine Stauproblematik durch ein wachsendes  $\alpha$ , was – selbst wenn der schienengebundene Anteil auch noch so klein wäre – doch tendenziell eine Abschwächung der Nutzenminderung bewirken würde. Drittens ist zu vermuten, dass im Staufall die stressbedingte Nutzenminderung höher ist, wenn der Verkehrsteilnehmer (wie im MIV) selber am Steuer sitzt. Diese Gründe determinieren einen bei steigendem  $\alpha$  steiler fallenden Verlauf des Graphen der Nutzenfunktion im MIV-Fall als im ÖPNV-Fall.<sup>23</sup>

Der unterschiedlich steile Verlauf der beiden Kurven begründet die Existenz eines Schnittpunktes N. Die Lage von N ist abhängig von der Kapazitätsgrenze  $b$  und der durch die

<sup>20</sup> Vgl. Steg et al. (2001), S. 151 ff.

<sup>21</sup> Vgl. etwa Hensher/Stopher (1979), Recker/Golob (1976), Steg (2003), S. 187 ff. oder Jakubowski et al. (1998), S. 8 ff.

<sup>22</sup> Vgl. etwa Lawton et al. (1997) oder Nääätänen/Summala (1976).

<sup>23</sup> Vgl. Marner (2004), S. 67.

Präferenzen der Nutzer determinierten Verläufe der Nutzenkurven. Unter der Annahme individuell rationalen Verhaltens der Akteure entpuppt sich der Schnittpunkt N mit seinem  $\alpha = c$  als stabiles Nash-Gleichgewicht (in reinen Strategien).<sup>24</sup> Ein derartiges Nash-Gleichgewicht existiert genau dann, wenn kein Akteur einen Anreiz zu einer Strategieänderung hat, gegeben die anderen Akteure weichen ebenfalls nicht von ihrer (bestmöglichen) Strategie ab.<sup>25</sup> Wenn also N ein derart stabiles Gleichgewicht ist, hat ohne externen Eingriff in das System kein Verkehrsteilnehmer einen Anreiz, seine Strategie zu ändern, um ein anderes Verkehrsmittel zu nutzen, und somit ist der Anteil der MIV-Nutzer  $\alpha = c$ , der Anteil der ÖPNV-Nutzer  $\beta = 1 - c$  und der resultierende Nutzen eines jeden Akteurs z.

Unter den genannten – und durchaus realistischen – Voraussetzungen konvergiert die Verteilung ( $\alpha, \beta$ ) der Verkehrsteilnehmer auf der betrachteten Strecke AB, unabhängig von der Höhe des aktuell betrachteten  $\alpha$ , zum Gleichgewicht ( $c, 1 - c$ ). Dies ist wie folgt erklärbar: Angenommen das tatsächliche  $\alpha$  sei  $c$ , so dass der Schnittpunkt N realisiert sei. Hat ein Akteur an diesem Punkt einen Anreiz, seine gewählte Strategie zu ändern? Wenn beispielsweise ein Autofahrer den Wunsch verspürt, seine Strategie zu ändern, also das Auto gegen die Nutzung des ÖPNV zu substituieren, impliziert dies eine marginale Minderung  $\varepsilon$  (nämlich um genau den Anteil eines Autofahrers an den gesamten Verkehrsteilnehmern auf der betrachteten Strecke) von  $\alpha$ , so dass  $\alpha_{\text{neu}} = c - \varepsilon$  ist.<sup>26</sup> Somit gilt für den (nach dem „Umsteigen“) neuen ÖPNV-Nutzer an der Stelle  $\alpha_{\text{neu}} = c - \varepsilon$  nunmehr der durchgezogene Graph der Nutzenfunktion, der bei  $\alpha_{\text{neu}} = c - \varepsilon$  allerdings unterhalb des gestrichelten Graphen liegt, so dass bei  $\alpha_{\text{neu}} = c - \varepsilon$  der Nutzen eines jeden Akteurs höher wäre, wenn er den MIV nutzen würde. Folglich hätte er an dieser Stelle wieder einen Anreiz, zurück auf den MIV „umzusteigen“ und somit von  $\alpha_{\text{neu}} = c - \varepsilon$  zu  $\alpha = c$ , dem Ausgangspunkt N also, zurückzukehren. Folglich besteht für einen Autofahrer am Punkt  $\alpha = c$  kein Anreiz zu einer Strategieänderung.

Analog hat auch ein ÖPNV-Nutzer keinen Anreiz, am Gleichgewichtspunkt N seine Strategie zu ändern. Würde er das Verkehrsmittel wechseln, bedeutete dies eine Verschiebung von  $\alpha = c$  hin zu  $\alpha_{\text{neu}} = c + \varepsilon$ . Hier wäre allerdings der Nutzen für den ÖPNV-Fall höher als für den Fall der MIV-Nutzung, so dass bei  $\alpha = c$  auch für den ÖPNV-Akteur keinerlei Anreiz für eine Strategieänderung besteht. Gegeben die beste Strategie der anderen Akteure besteht kein Anreiz, von N abzuweichen, so dass die Verteilung ( $c, 1 - c$ ) zweifelsohne ein Nash-Gleichgewicht (in reinen Strategien) darstellt. ( $c, 1 - c$ ) ist nicht nur ein stabiles Nash-Gleichgewicht, sondern zudem das einzige Gleichgewicht in diesem Spiel, denn alle ande-

<sup>24</sup> Vgl. zu Gleichgewichten in n-Personenspielen bei sich schneidenden Graphen der Nutzenfunktionen Schelling (1978), S. 226 ff.

<sup>25</sup> Vgl. Rasmusen (1994), S. 23. Vgl. Binmore (1992), S. 47, nach dem ein Nash-Gleichgewicht dann vorliegt, wenn die Akteure bei der Wahl ihrer Strategie wechselseitig die beste Antwort auf die Strategie der anderen Akteure spielen.

<sup>26</sup>  $\varepsilon$  sei als jede beliebige, noch so kleine Zahl und damit in diesem Zusammenhang als marginale Veränderung definiert. Somit sei durch  $c - \varepsilon$  der Anteil gemeint, an dem die Zahl der Autonutzer, die zum Anteil der Autonutzer  $c$  geführt hat, gegenüber  $c$  um nur einen Autonutzer verringert sei.

ren denkbaren Verteilungen konvergieren zu  $(c, 1 - c)$  hin. So erzeugen alle Verteilungen etwa links von  $\alpha = c$ , z.B.  $\alpha_{\text{neu}} = c - 2\varepsilon$ ,  $\alpha_{\text{neu}} = c - 3\varepsilon$  u.s.w. erst recht Anreize für die Verkehrsteilnehmer, sich durch Umsteigen auf den MIV in Richtung  $\alpha = c$  zu bewegen. Genauso generieren alle Verteilungen rechts von  $\alpha = c$ , also etwa  $\alpha_{\text{neu}} = c + 2\varepsilon$ ,  $\alpha_{\text{neu}} = c + 3\varepsilon$  u.s.w. Anreize zum Umstieg von MIV auf ÖPNV bis hin zum Erreichen des Nash-Gleichgewichts  $(c, 1 - c)$ . Da dies ein eindeutiges Nash-Gleichgewicht ist, ist nicht nur gewährleistet, dass diese Verteilung Bestand hat, wenn sie einmal erreicht ist, sondern zudem, dass bei einem angenommenen entsprechenden Mindestvolumen an Fahrzeugen auf der definierten Strecke diese Verteilung auf MIV und ÖPNV auch stets erreicht wird. Aus der gleichgewichtigen Verteilung  $(c, 1 - c)$  folgt dann für alle Verkehrsteilnehmer sofort ein Nutzen in Höhe von  $z$ .

#### 4. Innerstädtische Staus als (n-Personen-) Gefangenendilemma

Aus der Stabilität des Nash-Gleichgewichts folgt, dass der resultierende Nutzen eines jeden Akteurs in Höhe von  $z$  unterhalb des Nutzens in Höhe von  $y$  liegt. Somit bewirkt das individuell rationale Verhalten der Verkehrsteilnehmer, welches – gemäß der unterschiedlichen Präferenzen der Akteure – zumindest einen Teil  $\alpha = c$  dazu bewegt, die defektierende Strategie MIV zu wählen, ein für alle Akteure insofern unerwünschtes Ergebnis, dass a) der Anteil der MIV-Nutzer  $\alpha = c$  oberhalb von  $b$  liegt und somit einen Stauzustand erzeugt, der den Akteuren längere Reisezeiten und somit höhere Reisekosten auferlegt und b) die aus dieser Verteilung  $(c, 1 - c)$  resultierende Auszahlung  $z$  unterhalb der durch kollektiv kooperatives Verhalten erzielbaren Auszahlung  $y$  liegt.  $y$  ist hier zu verstehen als die Auszahlung im Falle kooperativer Rationalität der Akteure. Der Fall unterschiedlicher Auszahlungen bei individuell und kollektiv rationalem Verhalten deutet auf die Existenz eines Gefangenendilemmas hin.<sup>27</sup> Ein Gefangenendilemma liegt – zunächst vereinfacht für den Fall zweier Akteure und zweier möglicher Strategien – formal dann vor, wenn bei der  $2 \times 2$ -Auszahlungsmatrix aus Abbildung 2 die Auszahlungen folgenden Bedingungen folgen:

- (1)  $2R > T + S > 2P$  sowie
- (2)  $T > R$  und  $P > S$ .<sup>28</sup>

Unter den Bedingungen  $T > R$  und  $P > S$  liefert die Strategie D für beide Akteure eine dominante Strategie, da die Auszahlung für jeden individuell rationalen Akteur unabhängig von der Entscheidung des anderen Akteurs höher ist, wenn er D wählt. Daraus folgt die Realisierung der Auszahlung  $(P, P)$ , die für jeden Akteur im Falle von  $2R > T + S > 2P$

<sup>27</sup> Vgl. dazu auch Berg et al. (2003), S. 177 ff., die davon ausgehen, dass in einem Gefangenendilemma einzelwirtschaftlich rationales Verhalten zu individuellen und kollektiven Schädigungen führt. Vgl. zum Gefangenendilemma auch Axelrod (2000).

<sup>28</sup> Die erste formale Formulierung des 2-Personen-Gefangenendilemmas erfolgte durch Tucker. Vgl. dazu Tucker (1983), S. 288 ff. Vgl. auch Hamburger (1973).

eine schlechtere Lösung darstellt als die Auszahlung (R, R), die Resultat einer kollektiv kooperativen Strategie gewesen wäre.<sup>29</sup>

**Abbildung 2: Allgemeines Gefangenendilemma (vereinfachte Darstellung für zwei Akteure mit jeweils zwei Strategien)**

Spieler 1	Spieler 2	kooperative Strategie (K)	Defektierende Strategie (D)
kooperative Strategie (K)		R, R	S, T
defektierende Strategie (D)		T, S	P, P

Quelle: Eigene Darstellung nach Rasmusen (1994), S. 30.

Verbalisiert ist die Erfüllung folgender beider Bedingungen als Indiz für die Existenz eines Gefangenendilemmas zu interpretieren:

- Jeder Akteur erhält – unabhängig von den Entscheidungen des anderen Akteurs – eine höhere Auszahlung, wenn er defektiert statt zu kooperieren, so dass „Defektieren“ eine dominante Strategie für ihn darstellt und
- beide Individuen haben im Falle kollektiver Kooperation eine höhere Auszahlung als im Falle kollektiver Defektion.<sup>30</sup>

Der – im Grunde einzige – Unterschied der vereinfachten 2x2-Betrachtung zum im innerstädtischen Stau relevanten n-Personenfall besteht darin, dass bei Betrachtung von mehr als zwei Akteuren zahlreiche „Zwischenlösungen“ relevant werden können. So werden bei Übertragung auf den n-Personenfall nicht mehr lediglich vier mögliche Strategien [(K, K), (K, D), (D, K), (D, D)] betrachtet, sondern aufgrund der n Akteure nahezu unzählbar viele, nämlich  $2^n$  Strategien. Die Auszahlungen der Akteure sind im n-Personenfall in hohem Maße von der Anzahl der Akteure abhängig, welche Strategie D oder eben K wählen.<sup>31</sup> Dies erfordert (lediglich) die Ausweitung der Definition eines Gefangenendilemmas wie folgt:<sup>32</sup>

<sup>29</sup> Vgl. Van Vugt et al. (1995), die den zu analysierenden Fall der Wahl von Verkehrsteilnehmern zwischen öffentlichem Verkehr und Auto als 2-Personen-Fall darstellen und als dominante Strategie die individuell rationale Wahl der Nutzung des Autos ermitteln. Auch in diesem Fall liegt gemäß Abbildung 2 ein Gefangenendilemma vor.

<sup>30</sup> Vgl. dazu konkret Dawes (1980), S. 169 ff. Vgl. Joshi et al. (2005), die in einer experimentellen Untersuchung eher ein Versicherungsspiel identifizieren, in dem verschiedene Risikoneigungen die Ergebnisse beeinflussen.

<sup>31</sup> Wenn bei zwei Akteuren beide D wählen, also die Wahl des MIV bevorzugen, entsteht – übertragen auf das innerstädtische Beispiel – Stau (Auszahlung (P, P)), wenn beide K wählen, also durch Wahl des ÖPNV kooperieren, haben beide freie Fahrt (Auszahlung (R, R)), während die Hybridfälle – einer wählt D, der andere K – in der Auszahlungsmatrix durch (T, S) bzw. (S, T) unmissverständlich definiert werden.

<sup>32</sup> Vgl. zu den folgenden Ausführungen zum n-Personen-Gefangenendilemma Schelling (1978), S. 211 ff.

- (1) Es interagieren  $n$  Akteure mit binärer Strategiewahl (Wahl der defektierenden Strategie D, also Nutzung des MIV oder Wahl der kollektiven Strategie K, also Nutzung des ÖPNV) und einheitlichen Auszahlungen.
- (2) Jeder Akteur hat eine – von der Strategie der anderen Akteure unabhängige bevorzugte Strategie D.<sup>33</sup>
- (3) Unabhängig von der eigenen Wahl ist der Nutzen eines jeden Akteurs je höher, desto mehr andere Akteure die kooperative Strategie K wählen.
- (4) Es existiert ein kritischer Parameter  $g > 1$ , so dass, wenn zumindest  $g$  Akteure die kooperative Strategie K (ÖPNV) und die anderen Akteure die defektierende Strategie D (MIV) wählen, die Akteure, die K wählen, besser gestellt sind, als wenn alle Akteure Strategie D wählen würden. Dies gilt nicht für den Fall, dass die Anzahl der Akteure mit Strategiewahl  $K < g$  ist.<sup>34</sup>

Diese Definition trifft genau auf den Fall innerstädtischen Staus mit seinen  $n$  Akteuren, den sich schneidenden Nutzenkurven der MIV- bzw. ÖPNV-Akteure und dem resultierenden Nash-Gleichgewicht zu. Es liegt ein  $n$ -Personen-Gefangenendilemma vor.<sup>35</sup>

## 5. Wirkungsweise ausgewählter wirtschaftspolitischer Maßnahmen

Die Stabilität des betrachteten Gleichgewichts impliziert, dass die Akteure aufgrund der fehlenden Anreize, die kooperative Strategie zu wählen, nicht in der Lage sind, sich aus dem Dilemma zu befreien. Ergo ist ein externer Eingriff in Form einer wirtschaftspolitischen Maßnahme vonnöten, um das Dilemma zu mindern bzw. zu zerbrechen. Eine Minderung des Dilemmas ist dann erreicht, wenn eine Annäherung des Gleichgewichts in Richtung Kapazitätsgrenze der Straße erfolgt, also im Grunde durch Reduzierung des Staus und somit der Staukosten. Dies hätte dadurch eine erwünschte wohlfahrtssteigernde Wirkung, sei es durch Reduzierung der Fahrzeuge auf der betrachteten Strecke oder etwa durch Ausbau der Kapazität. Grundsätzlich sind drei Gruppen von Maßnahmen denkbar, die ein Aufbrechen des Dilemmas ermöglichen könnten, indem sie die Auszahlungsstrukturen des Gefangenendilemmas zu modifizieren in der Lage sind.

<sup>33</sup> Die präferierte Strategie ist hier – wie zuvor im innerstädtischen Kontext detailliert erläutert – als die defektierende Strategie der Wahl des MIV zu verstehen, während die nicht-präferierte Strategie als die kooperative Strategie K – etwa übertragen auf die innerstädtische Stauproblematik die Wahl des ÖPNV – zu interpretieren ist.

<sup>34</sup> Die Bedeutung des kritischen Parameters  $g$  dokumentiert sich in seiner Rolle als Mindestgröße einer Koalition von Akteuren, die durch Abkehr von der Nutzung des MIV besser gestellt sind als im Falle kollektiver MIV-Wahl. Allerdings ist zu beachten, dass der Rest der Akteure, also diejenigen, die gleichwohl den MIV nutzen, noch besser gestellt sind, so dass unabhängig vom Anteil der Akteure, die den ÖPNV nutzen, jeder einzelne Verkehrsteilnehmer einen dominanten Anreiz hat, Auto zu fahren und es somit letztlich individuell rational ist, dass alle Akteure Auto fahren und somit den Weg in das Dilemma ebnen. Dies ist gerade relevant im Fall sich schneidender Nutzenkurven. Vgl. Schelling (1978).

<sup>35</sup> Vgl. Schelling (1978), S. 211 ff., vgl. Ziegler (2005), S. 106, der den morgendlichen Berufsverkehr als „typisches Nash-Gleichgewicht“ charakterisiert.

- a) ein Kapazitätsausbau der Straßeninfrastruktur
- b) eine Senkung der Anreize, den MIV zu nutzen
- c) eine Setzung von Anreizen, Alternativen zum MIV (wie den ÖPNV) zu nutzen.

Im Folgenden soll die Wirkungsweise dreier wirtschaftspolitischer Maßnahmen als relevante und zudem aktuell diskutierte Beispiele aus den oben angeführten drei Gruppen von Maßnahmen im Modellkontext erläutert werden, erstens ein Kapazitätsausbau durch etwa einen Aus- oder Neubau von Straßenraum, zweitens eine Einführung von Straßenbenutzungsgebühren<sup>36</sup> und drittens eine Steigerung der Attraktivität des ÖPNV durch Berücksichtigung von Busspuren und/oder dem Einsatz von schienengebundenem Verkehr oder beispielsweise eine substantielle Steigerung der Buskapazitäten.<sup>37</sup>

### 5.1 Kapazitätserweiterungen

Ein Kapazitätsausbau bewirkt grundsätzlich eine Angebotsausweitung des Straßenraums und somit tendenziell eine Minderung der Staugefahr durch das Verschieben der Kapazitätsgrenze  $b$  in Abbildung 1 nach rechts.<sup>38</sup> Zu beachten sind dabei allerdings folgende relevanten Aspekte:

- Es bestehen gerade innerörtlich erhebliche städtebauliche, politische und räumliche Restriktionen, die einen angebotswirksamen Kapazitätsausbau unmöglich bzw. prohibitiv teuer und somit nur schwer realisierbar werden lassen.
- Zu berücksichtigen sind – etwa im Rahmen von Nutzen-Kosten-Analysen – die erheblichen Investitionskosten von Kapazitätserweiterungen.
- Eine Erweiterung des angebotenen Straßenraums generiert induzierten Verkehr,<sup>39</sup> so dass – in Anlehnung an Downs (1962) und sein „fundamentales Staugesetz“ – ein Infrastrukturausbau zwingend zur Erhöhung des Verkehrsaufkommens führt. Nach Downs' Staugesetz führt die latente Nachfrage dazu, dass selbst ein in der Kapazität erhöhtes Straßennetz innerhalb kurzer Zeit erneut staubelastet ist.<sup>40</sup> Dies steht in Einklang mit den Implikationen des innerstädtischen Staumodells, wie Abbildung 3 zeigt.<sup>41</sup>

<sup>36</sup> Andere Möglichkeiten der Senkung der Anreize, das Auto zu nutzen, wären etwa eine Erhöhung der Mineralöl- oder Kfz-Steuer, Zufahrtsbeschränkungen zu/in den Innenstädten (autofreie Tage, autofreie Zonen, Nummernschildbeschränkungen etc.) oder eine Parkraumbewirtschaftung (Parkraumverknappung, Bepreisung von Parkraum etc.).

<sup>37</sup> Weitere Möglichkeiten der Steigerung von Anreizen, Alternativen zum MIV zu nutzen, wären etwa eine Förderung von Park & Ride oder Kiss & Ride, Car Sharing, eine Verbesserung des Fahrradwegesystems oder die Förderung von Job Tickets oder Studententickets etc.

<sup>38</sup> Vgl. Small et al. (1989), S. 9 f.

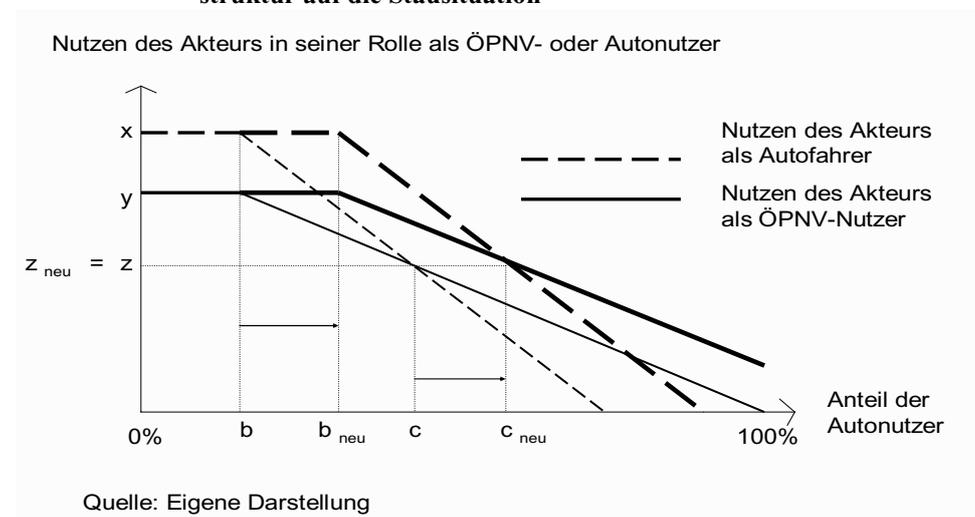
<sup>39</sup> Vgl. zur Wirkung des induzierten Verkehrs etwa DeCorla-Souza/Cohen (1998), die die Effekte induzierten Verkehrs bei der Ausweitung von Straßenkapazitäten bei unterschiedlichen Stauniveaus und Nachfrageelastizitäten schätzen oder Marte (2005), S. 491 ff.

<sup>40</sup> Vgl. Downs (1962), Heng (2000), S. 56 ff.

<sup>41</sup> Vgl. Marner (2004), S. 70 f.

- Das so genannte Braess-Paradoxon unterstützt diese Argumentation ebenso. Das Paradoxon zeigt, dass eine Verkehrssteuerung über einen Kapazitätsausbau die mittlere Reisezeit aller Akteure aufgrund ihres individuell rationalen, auf Minimierung der Reisezeit angelegten Verkehrsverhaltens durchaus erhöhen kann. Es wird anhand eines einfachen Modells die Ungültigkeit der allgemeinen Aussage gezeigt, dass zusätzlicher Straßenraum die Reisezeiten im Gesamtnetz verkürzt.<sup>42</sup>

**Abbildung 3: (Nicht-) Wirkungen eines Kapazitätsausbaus von Straßeninfrastruktur auf die Stausituation**



Der Kapazitätsausbau als Angebotsvergrößerung bewirkt eine Verschiebung der Kapazitätsgrenze von  $b$  auf  $b_{neu}$ . Ceteris paribus verschieben sich als Folge dessen die – nach wie vor wie in Abbildung 1 (hier in Abbildung 3 dünn gezeichnet) geneigten – Nutzenkurven parallel nach rechts, so dass jetzt in Abbildung 3 die fett gezeichneten Nutzenkurven Gültigkeit besitzen.<sup>43</sup> Es ergibt sich ein neues stabiles Nash-Gleichgewicht (in reinen Strategien) bei  $(c_{neu}, 1-c_{neu})$ , welches gleich weit von  $b_{neu}$  entfernt ist wie  $c$  von  $b$  entfernt war, so dass der Stauzustand unverändert bleibt. Aus dem neuen Gleichgewicht folgt  $z_{neu} = z$ , so dass der Kapazitätsausbau keinen Einfluss auf den Nutzen aller beteiligten Akteure hat. Der induzierte Verkehr, der durch  $(c_{neu}-c)$  darstellbar ist, folgt laut vorgestelltem Modell der Prognose Downs (1962)<sup>44</sup> und kompensiert den Kapazitätsausbau, der aus Stauge-

<sup>42</sup> Vgl. Braess (1968), S. 258-268, Ziegler (2005), S. 106 f.

<sup>43</sup> Verwirft man die Annahme „ceteris paribus“ und lässt kapazitätsbedingt veränderte Neigungen der Nutzenkurven zu, unterstellt man dadurch eine doch leicht Stau mindernde Wirkung, welche die Nutzenkurve der MIV-Nutzer in stärkerem Maße abflachen lassen würde als die der ÖPNV-Nutzer, was tendenziell sogar eine Nutzenminderung in Form eines höheren  $\alpha$  und einer niedrigeren Auszahlung zur Folge hätte. Dies würde einem überproportional starken induzierten Verkehr entsprechen.

<sup>44</sup> Vgl. Downs (1962).

sichtspunkten wirkungslos bleibt.<sup>45</sup>

## 5.2. Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren

Die Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren gilt in der ökonomischen Literatur als effizientes Instrument zur Minderung der staubedingten Wohlfahrtsverluste.<sup>46</sup> Wenngleich weitgehend Einigkeit darüber herrscht, dass First Best-Lösungen nicht praktikierbar sind, werden doch zahlreiche Second Best-Lösungen vorgeschlagen, die den First Bests aus Effizienz Gesichtspunkten zwar unterlegen sind,<sup>47</sup> die aber aufgrund ihrer Praktikabilität und ihrer zum Teil vergleichsweise geringen Systemkosten auch – selbst allen politökonomischen Hindernissen zum Trotz – durchführbar erscheinen. So zeigen vor allem in jüngster Zeit die erfolgreiche Implementierung der London City Congestion Charge mit einer erreichten Verkehrsmengenminderung in Höhe von 26%<sup>48</sup> und die zumindest aus Stauge-sichtspunkten offensichtlich erfolgreich abgeschlossene Testphase der Stockholm „Trängselskatten“, dass ein Road Pricing aus Lenkungssicht erfolgreich sein kann.<sup>49</sup> Auch sind die Erfahrungen des urbanen Vorreiters des Road Pricing Singapur mit seinem „Electronic Road Pricing ERP“ vorwiegend positiv zu bewerten.<sup>50</sup> So ist es nicht verwunderlich, dass bereits zahlreiche weitere Großstädte wie Paris, Brüssel, Oslo, Mailand oder Helsinki derzeit die Einführung oder Ausweitung eines urbanen Road Pricing planen oder – wie in Bologna – bereits eingeführt haben.<sup>51</sup> Geeignete Überblicke über die Theorie des urbanen Road Pricing, auf deren Details in diesem Rahmen nicht näher eingegangen wird, bieten etwa May/Nash (1996), Arnott (2001), Verhoef (2004) oder in sehr analytischer Form Yang/Huang (2005).

Die Wirkungsweise der Einführung von Straßenbenutzungsgebühren entspricht grundsätzlich dem Pigou'schen Grundgedanken der Internalisierung externer Effekte mittels einer optimalen Gebühr. Laut ökonomischer Theorie bedarf es beim Vorliegen externer Effekte –

<sup>45</sup> Zu bedenken ist allerdings, dass hier lediglich Staugesichtspunkte betrachtet werden. Investitionen in die Infrastruktur induzieren zweifelsohne davon absehende weitere positive Wohlfahrtseffekte. Vgl. dazu etwa Aschauer (1989), Baum/Behnke (1997), Baum/Kurte (1999), Hartwig/Armbrecht (2005), Gramlich (1994) oder Vickerman (2000).

<sup>46</sup> Vgl. Eisenkopf (2002).

<sup>47</sup> Vgl. Proost/van Dender (1999), S. 88, die aufzeigen, dass in geeigneter Weise eingesetzte Second Best-Lösungen dem First Best auf Effizienz-sicht nur knapp unterlegen sind.

<sup>48</sup> Vgl. Transport for London (2006), S. 3.

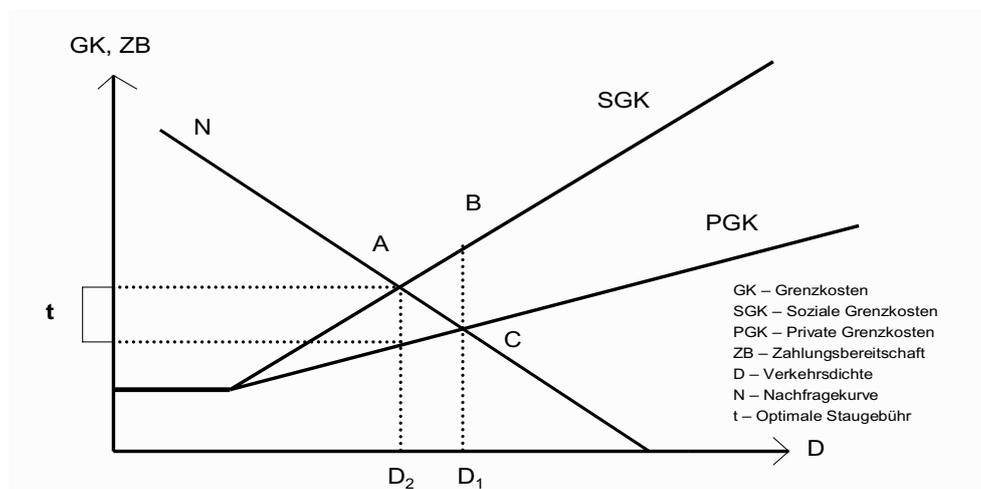
<sup>49</sup> Vgl. zu der Diskussion der Erfolge des Beispiels London City Congestion Charge Marner (2004), S. 87 ff., Eichinger/Knorr (2004) und Prud'homme/Bocajero (2005), S. 279 ff. Vgl. zum Beispiel Stockholm etwa Ar-melius/Hultkrantz (2005) oder Abboud/Clevstrom (2006).

<sup>50</sup> Vgl. zu den Erfahrungen in Singapur Olszewski/Xie (2005), S. 755 ff.

<sup>51</sup> Vgl. zu den verschiedenen Planungen und Forschungen die Ausführungen von de Palma/Lindsey/Niskanen (2006), de Palma/Lindsey/Proost (2006), Vold (2006), de Palma/Lindsey (2006), Proost/Sen (2006) oder be-züglich der im Mai 2006 implementierten City-Maut Bologna und der für Januar 2007 geplanten Einführung der City-Maut Mailand o.V. (2006a) und o.V. (2006b).

wie eben beim Auftreten von Staukosten<sup>52</sup> – der Internalisierung dieser Effekte, um drohende Wohlfahrtsverluste abzuwenden. Als – zumindest theoretisch überzeugendes – (allerdings lediglich statisches) Instrument dient die so genannte Pigou-Steuer, welche – bezogen auf das knappe Gut Straßenraum – die Nutzung dieses Gutes wie in Abbildung 4 verdeutlicht durch Implementierung einer optimalen Gebühr  $t$  in Höhe der Differenz aus sozialen und privaten Grenzkosten (also des externen Effekts) im sozialen Optimum bepreist und Anreize setzt, den Straßenraum effizient zu nutzen.<sup>53</sup>

**Abbildung 4: Internalisierung externer Effekte durch optimale Gebühr**



Quelle: Eigene Darstellung nach Walters (1968), S. 24.

Diese optimale Gebühr  $t$  als Mittel zur Internalisierung wohlfahrtsschädigender externer Effekte als First Best-Lösung ist jedoch leider kaum von praktischer Relevanz, da sie nur dann durch Verhinderung des Wohlfahrtsverlustes der Flächengröße ABC aus Abbildung 4 effizient ist, wenn a) der betrachtete „Markt für Straßenverkehr“ statisch wäre und b) die Verläufe der relevanten Kurven und damit auch die Größe des externen Effektes bekannt wären. Beides ist – wie in der Literatur oftmals angemerkt – leider unrealistisch.<sup>54</sup> Aufgrund der Nicht-Realisierbarkeit von First Best-Lösungen bedarf es daher – wie oben bereits angedeutet – geeigneter Second Best-Lösungen, die eine Minderung des staubedingten Wohlfahrtsverlustes bewirken können.<sup>55</sup> Das im Staumodell auftretende Gefangenendi-

<sup>52</sup> Vgl. zu dieser Diskussion Schrage (2005), S. 29 ff.

<sup>53</sup> Vgl. zu diesem Konzept neben Pigou (1920) bereits Dupuit (1844), Walters (1961) oder erstmals in einer angemessenen graphischen Darstellung Walters (1968). Vgl. dazu auch Baum (1971).

<sup>54</sup> Vgl. beispielsweise Lindsey/Verhoef (2000).

<sup>55</sup> Vgl. dazu u.a. Sumalee (2004), der etwa für Edinburgh mit Hilfe geeigneter Algorithmen optimale Cordons berechnet.

lemma könnte als Rechtfertigung eines Eingriffs dienen, welcher die Akteure extern aus dem Dilemma befreit, um so positive Wohlfahrtswirkungen zu erzeugen.

Im betrachteten Modellrahmen aus Abbildung 1 bewirkt eine Bepreisung des Straßenraums – unabhängig davon, ob durch eine optimale Gebühr  $t$  wie in Abbildung 4 oder durch alternative Second Best-Lösungen – Folgendes: Da die MIV-Akteure heterogen und mit unterschiedlichen Zahlungsbereitschaften ausgestattet sind, bedarf es hierzu einer differenzierten Betrachtung der Akteursgruppen.<sup>56</sup> Diejenigen, deren Zahlungsbereitschaft nach Einführung der Bepreisung höher ist als der Nutzungspreis, bleiben ihrer Strategie treu, fahren weiter MIV und sehen sich zwei Effekten gegenüber: Zunächst erleiden sie eine Nutzenminderung durch den erhöhten Nutzungspreis. Demgegenüber sind jedoch bei einer für den Bepreisungsfall zu erwartenden Stauminderung Nutzengewinne durch Zeitkostensparnisse zu berücksichtigen.

Ob der Nettoeffekt positiv oder negativ ist, ob also der Durchschnitt der betrachteten Akteursgruppe durch die Bepreisung besser oder schlechter gestellt ist, hängt vorwiegend von der Höhe der Gebühr und den jeweiligen Präferenzen der Akteure ab. Da das Ziel der Maßnahme die Stauminderung ist, muss gewährleistet sein, dass die Gebühr hoch genug ist, um den Durchschnitt dieser Akteursgruppe netto zu belasten, so dass der Anreiz der MIV-Nutzung durchschnittlich sinkt. Dies würde – wie Abbildung 5 zeigt – gegenüber der Darstellung der Ausgangssituation der Analyse aus Abbildung 1 eine Verschiebung der Nutzenkurve für den MIV-Nutzer nach unten implizieren.

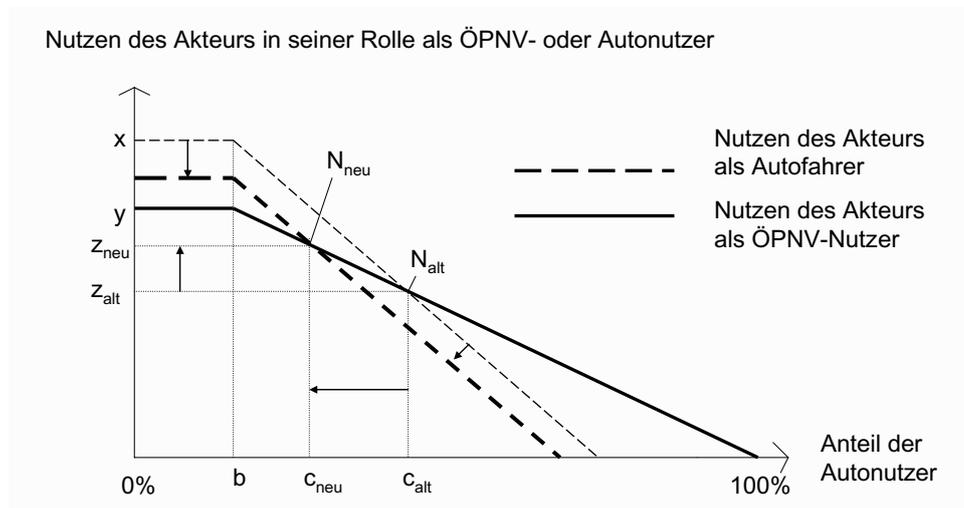
Diejenigen Akteure, deren Zahlungsbereitschaft allerdings nicht ausreicht, um den Nutzungspreis, der ja im Grunde die Summe aus individuellen herkömmlichen Kosten plus der Stauegebühr ist, zu decken, werden verdrängt. Verdrängung bewirkt dann entweder einen Strategiewechsel von  $D$  zu  $K$ , also ein Umsteigen auf „kooperativen“ ÖPNV oder eben das Unterlassen der Fahrt in die Innenstadt und somit das Ausscheiden aus dem Modell. Beides ist – bei ausschließlicher Betrachtung der Stauproblematik – zu begrüßen, da beides den Anteil  $\alpha$  mindert und den gleichgewichtigen Punkt aus Abbildung 1 nach links in Richtung eines staufreien Zustandes verschiebt. Eine wie bereits oben implizit geforderte hinreichend hohe Gebühr führt zu einer tendenziell starken „Verdrängung“ der MIV-Akteure hin zum ÖPNV, erzwingt also ein wohlfahrtssteigerndes kooperatives Verhalten. Dies ist im Grunde gleichbedeutend mit der in Abbildung 4 erkenntlichen Wirkungsweise der Pigou-Steuer, die den Autofahrer als Verursacher des externen Effekts „Stau“ zur Internalisierung dieses externen Effektes zwingt. Die Autofahrer, deren Zahlungsbereitschaft nicht ausreicht, um  $t$  zu zahlen, werden verdrängt, die Verkehrsdichte sinkt von  $D_1$  in Richtung  $D_2$  und der ex ante

<sup>56</sup> Vgl. Lehmann (1996), der bei einer politökonomischen Untersuchung einer Bepreisungsmaßnahme die beteiligten Verkehrsteilnehmer in fünf verschiedene Gruppen differenziert und analysiert, welche dieser Gruppen Netto-Gewinner und welche Netto-Verlierer einer derartigen Maßnahme sind.

bestehende Wohlfahrtsverlust ABC wird gemindert. Folglich ist das Erzwingen kooperativen Verhaltens nicht anderes als eine Möglichkeit zur Internalisierung externer Effekte.<sup>57</sup>

Abbildung 5 zeigt nun die Veränderung des Gleichgewichts aus dem Status quo der Abbildung 1 bei Einführung einer hinreichend hohen Gebühr, die dann netto zu einer durchschnittlichen Belastung der MIV-Akteure führt.

**Abbildung 5: Nutzen der MIV- bzw. ÖPNV-Akteure nach isolierter Implementierung einer hinreichend hohen Gebühr für die Nutzung des betrachteten Straßenraums**



Quelle: Eigene Darstellung.

Die fett gezeichnete, gestrichelte Linie entspricht dem Nutzen des Autofahrers nach Einführung der Bepreisung, während die dünne, gestrichelte Linie seinen Nutzen im Status quo illustriert. Es zeigt sich, dass die Erhebung von Nutzungsgebühren den Anteil der Autofahrer von  $c_{alt}$  nach  $c_{neu}$  verschiebt, woraus eine deutliche Stauminderung resultiert, die der Minimierung der Distanz  $c - b$  entspricht.  $c_{alt} - b$  ist deutlich größer als  $c_{neu} - b$ . Daraus folgt ein Wandern des Nash-Gleichgewichts von  $N_{alt}$  (im Status quo) hin zu  $N_{neu}$  (bei Bepreisung). Das Gefangenendilemma wird gemindert, da  $z_{neu}$  deutlich näher an  $y$  liegt als  $z_{alt}$ . Die Einführung von (hinreichend hohen) Straßenbenutzungsgebühren ist aus Stausicht somit grundsätzlich positiv zu bewerten. Von besonderer Wichtigkeit ist jedoch die Wahl der geeigneten Gebührenhöhe, die allerdings von verschiedensten Bedingungen abhängig ist. Neben politökonomischen Aspekten sind es vor allem auch die individuellen städti-

<sup>57</sup> Vgl. zu den Verteilungswirkungen einer Bepreisungsmaßnahme Teubel (2001), Lehmann (1996) oder Layard (1977).

schon Rahmenbedingungen, die beachtet sein müssen.<sup>58</sup> Allgemein gilt jedoch Folgendes: Eine hinreichende Gebührenhöhe bedeutet aus Modellsicht, dass sie gerade so hoch sein muss, um den MIV-Akteuren Anreize zu setzen, gerade eben ihre Strategie zu ändern. Abbildung 6 soll dies verdeutlichen.

**Abbildung 6: Vereinfachte Auszahlungsmatrix des MIV-Nutzers vor und nach Einführung von Straßenbenutzungsgebühren**

			mit $2R > T + S > 2P$ sowie $T > R$ und $P > S$ Nash-Gleichgewicht: (MIV, MIV)
Ohne Bepreisung	ÖPNV	MIV	
ÖPNV	R, R	S, T	t <sub>opt</sub> als optimale Gebühr mit folgendem Effekt: $T - t_{opt} < R$ und $P - t_{opt} < S$ (für den Teil der Akteure, deren Zahlungsbereitschaft nicht ausreicht, um die Preiserhöhung zu decken)  Nash-Gleichgewicht: (ÖPNV, ÖPNV)
MIV	T, S	P, P	
Mit Bepreisung	ÖPNV	MIV	
ÖPNV	R, R	S, T - t <sub>opt</sub>	
MIV	T - t <sub>opt</sub> , S	P - t <sub>opt</sub> , P - t <sub>opt</sub>	

Quelle: Eigene Darstellung.

Die obere Matrix zeigt die Nutzen der Akteure im Fall ohne Straßenbenutzungsgebühren. Im Falle der – wie bereits in Abbildung 2 dargestellten – ordinalen Rangordnung  $T > R$  und  $P > S$  sowie  $2R > T + S > 2P$  ergibt sich als Nash-Gleichgewicht die Strategienkombination (MIV, MIV) mit der Gesamtauszahlung in Höhe von  $2P$ , die geringer als die durch die kollektiv rationale Wahl von (ÖPNV, ÖPNV) erzielbaren  $2R$  ist. Folge ist ein stabiles Gefangenendilemma. Die untere Matrix zeigt die Auszahlungen der Akteure im Fall mit Straßenbenutzungsgebühren. Die Bepreisung in Höhe von  $t_{opt}$  bewirkt eine Verteuerung der Nutzung der betrachteten Strecke AB, was eine Minderung des MIV-Nutzens impliziert. Als Folge aus der Implementierung der Straßenbenutzungsgebühren gilt jetzt für einen Teil der Akteure, dass  $T - t_{opt}$  nunmehr kleiner ist als  $R$  und  $P - t_{opt}$  nunmehr kleiner ist als  $S$ . Dies gilt genau für den Teil der Fahrer, deren Zahlungsbereitschaft nicht ausreicht, um die Preiserhöhung durch die Implementierung der Preislösung zu decken. Für genau diese Fahrer gilt nun nicht nur eine veränderte Auszahlungsstruktur, die ja für alle Fahrer gilt, sondern darüber hinaus ist es für diese Akteure nach Einführung der Bepreisung ratio-

<sup>58</sup> Vgl. zu den politökonomischen Aspekten etwa Evans (1992), Gomez-Ibanez (1992), Lehmann (1996) oder Jones (1998), zu den Rahmenbedingungen Mamer (2004).

nal, ihre Entscheidung zu ändern und von MIV auf ÖPNV umzusteigen. Sie werden im Grunde von der Straße verdrängt, so dass der Anteil  $\alpha$  sinkt und – abhängig von sowohl der Höhe des  $t_{\text{opt}}$  als auch von der Struktur der Nachfrage nach Nutzung des Straßenraums – gegen  $b$  konvergiert. Für die MIV-Nutzer, also auch für diejenigen, für die gilt:  $R > T - t_{\text{opt}}$  und  $S > P - t_{\text{opt}}$ , bewirkt das  $t_{\text{opt}}$  natürlich durchschnittlich eine Nutzenminderung, so dass die Nutzenfunktion gemäß Abbildung 5 durch die Bepreisung nach unten verschoben wird. Zu beachten ist natürlich, dass der positive Wohlfahrtseffekt, der durch eine Implementierung von Straßenbenutzungsgebühren erreicht wird, nicht durch prohibitiv hohe System- bzw. Transaktionskosten aufgeessen wird, die den regulierenden und dilemmamindernden Eingriff zum Staatsversagen werden lassen würden.<sup>59</sup>

### 5.3 Setzung von Anreizen. Alternativen zum MIV zu nutzen

Neben der Minderung der Anreize, mit dem Auto in die Innenstadt zu fahren, dadurch – im Modellsinne zu defektieren und – die Staugefahr zu erhöhen, führt auch eine Anreizsetzung zur Nutzung von Alternativen des MIV dazu, das Gleichgewicht in Richtung eines staufreien Zustands zu verschieben. Modellgemäß wird hier repräsentativ lediglich eine Verbesserung des ÖPNV betrachtet. Diese kann grundsätzlich erreicht werden durch

- a) substanzielle Steigerungen der Buskapazitäten durch neue Routen, erhöhte Frequenzen und das Einsetzen größerer Busse,
- b) das Implementieren eines 24-Stunden-Services,
- c) die Verbesserung des Busspurensystems bzw. öffentlichen S- oder U-Bahnsystems sowie
- d) das Einfrieren der Busfahrpreise.

Die Maßnahmen a) und b) führen zu einer Parallelverschiebung der Nutzenkurve für den ÖPNV-Nutzer aus Abbildung 1, während die Maßnahme c) eine Abflachung der Neigung der Kurve bewirkt und Maßnahme d) im Modell eine neutrale Wirkung hat.

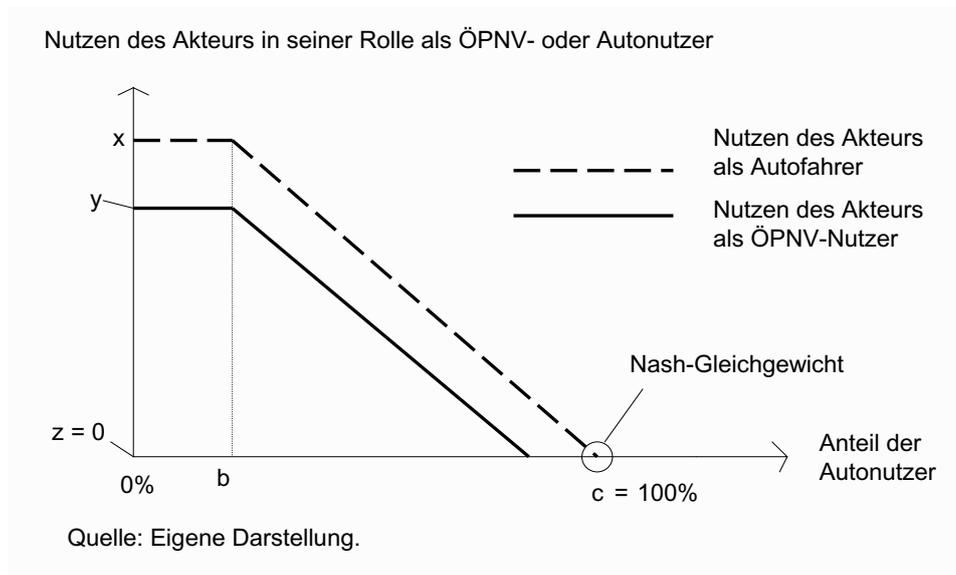
Die in Abbildung 1 dargestellte Ausgangssituation berücksichtigt bereits die Existenz eines Busspurensystems bzw. schienengeführten öffentlichen Verkehrs,<sup>60</sup> so dass schon dort eine flachere Neigung der Nutzenkurve im Fall der ÖPNV-Nutzung als im Fall der MIV-Nutzung resultiert. Anderenfalls würden beide Kurven parallel verlaufen, keinen Schnittpunkt innerhalb des Koordinatenkreuzes haben und somit ein Gleichgewicht provozieren,

<sup>59</sup> Vgl. zu dieser Problematik Prud'homme/Bocajero (2005), S. 279 ff., die die London City Congestion Charge trotz gelungener Verkehrslenkung als Mini-Concorde bezeichnen, da die prohibitiv hohen Systemkosten nicht durch die deutlich erhöhte durchschnittliche Reisezeit in London City zu rechtfertigen seien. Vgl. auch Baum et al. (2005), S. 47 ff., die im Rahmen einer möglichen Einführung einer Pkw-Maut in Deutschland nicht zu unrecht auf sehr hohe Systemkosten hinweisen.

<sup>60</sup> Es ist insofern realistisch, als Status quo Abbildung 1 mit der Berücksichtigung möglicher Busspuren bzw. schienengebundenen Verkehrs zu wählen, da von einer Durchschnittsbetrachtung auszugehen ist und zumindest nicht unwesentlich viele Städte über derartige Möglichkeiten verfügen.

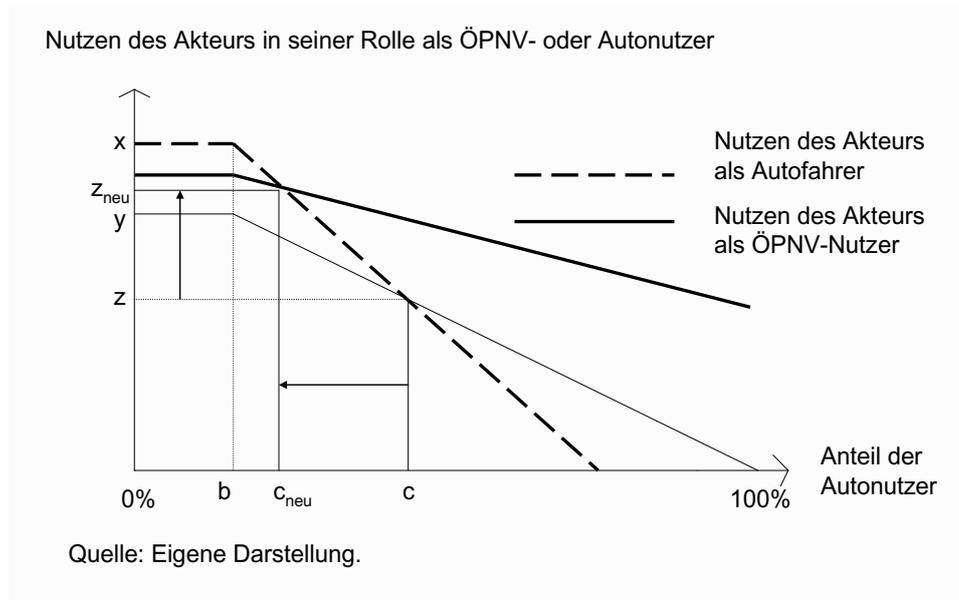
welches bei ( $\alpha = 100\%$ ,  $\beta = 0$ ) liegen würde, für alle Verkehrsteilnehmer die Autonutzung als dominante Strategie empfiehlt, extremen Stau verursacht und jedem Akteur eine minimale Auszahlung von 0 einbringt. Abbildung 7 zeigt diesen Fall.

**Abbildung 7: Gefangenendilemma und extremer Stau im Falle ohne Busspuren-system bzw. schienengeführtem Verkehr**



Eine – wie unter 5.3. vorgeschlagene – Verbesserung des Busspuren-systems aus Abbildung 1 impliziert nun eine noch flachere Neigung der Nutzenkurve des Bus-Nutzers als in Abbildung 1 und daraus resultierend ein Nash-Gleichgewicht an einem Punkt, der näher an der Kapazitätsgrenze  $b$  liegt als  $c$ . Somit würde dieses Gleichgewicht entstehen lassen, welches das Ausmaß des Gefangenendilemmas mindern würde. Abbildung 8 zeigt also die isolierte Wirkungsweise der Verbesserung des ÖPNV, also die Wirkung dieser Maßnahme c) gemeinsam mit den Wirkungen der Maßnahmen a) und b).

Aus a), b) und c) resultiert eine Erhöhung des Nutzens aller Verkehrsteilnehmer von  $z$  auf  $z_{\text{neu}}$ . Dieser neue Nutzen  $z_{\text{neu}}$  kann – je nach Intensität der Verbesserung des ÖPNV-Systems – sogar  $y$  übertreffen. Abbildung 8 symbolisiert eine starke Verbesserung des ÖPNV-Systems, die sicherlich nur dann realistisch ist, wenn, wie etwa im Beispiel der London City Congestion Charge, ein hoher Anteil von Einnahmen aus einer möglichen Implementierung von Straßenbenutzungsgebühren in den ÖPNV fließt. Falls nicht, würde  $z_{\text{neu}}$  zwar  $z$  übertreffen, jedoch nicht notwendigerweise  $y$ .

**Abbildung 8: Isolierte Wirkungsweise einer Verbesserung des ÖPNV**

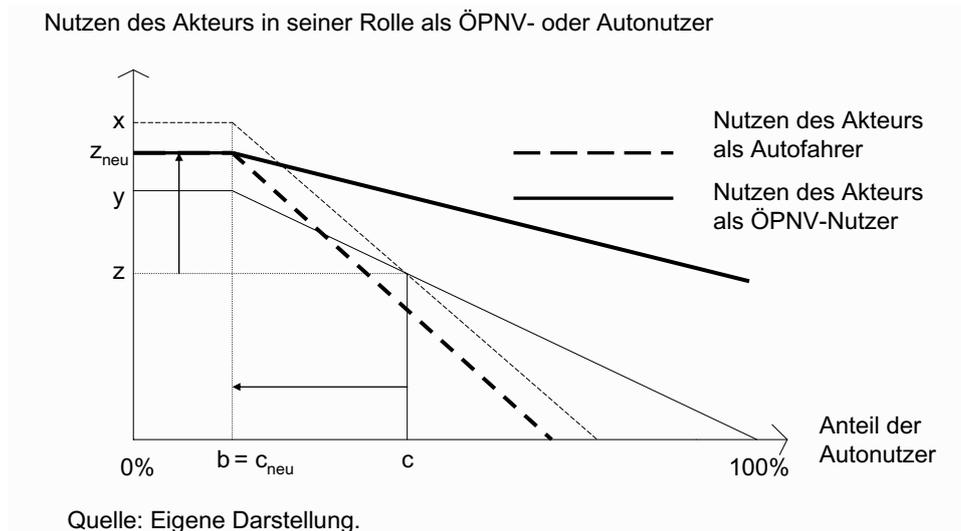
#### 5.4. Gesamtwirkung der diskutierten Maßnahmen

Die Gesamtwirkung dieser möglichen Maßnahmen wird durch Abbildung 9 illustriert. Ein Kapazitätsausbau wird aus den in Kapitel 5.1. erläuterten Gründen nicht berücksichtigt, so dass hier ein Paket aus Straßenbenutzungsgebühren und einer Verbesserung des ÖPNV als flankierender Maßnahme betrachtet wird.<sup>61</sup>

Die dünn gezeichneten Kurven zeigen den Ausgangszustand aus Abbildung 1, während die fett gezeichneten Kurven das Resultat der Einführung der Straßenbenutzungsgebühren (Verschiebung der gestrichelten Kurve nach unten) plus der Verbesserung des ÖPNV (Verschiebung der durchgezogenen Kurve nach oben und zusätzlich Abflachung der Neigung) sind. Das Gleichgewicht verschiebt sich von  $c$  zu  $c_{\text{neu}} = b$  und impliziert – allerdings wie hier bei gegebener starker Intensität der Eingriffe – somit einen staufreien Zustand, zumindest aber eine signifikante Verlagerung des Gleichgewichts in Richtung des staufreien Zustands. Der Nutzen aller Akteure erhöht sich von  $z$  auf  $z_{\text{neu}}$ , welches zwar kleiner als  $x$ , gleichwohl aber größer als  $y$  ist. Das Gefangenendilemma ist zerbrochen und der Stau ist zumindest gemindert, eventuell sogar beseitigt. Der Wohlfahrtsverlust ABC aus Abbildung 4 ist beseitigt oder zumindest minimiert worden.

<sup>61</sup> Vgl. dazu Armelius/Hultkrantz (2005), die mit Hilfe einer Simulation zeigen, dass es gerade in den Städten mit einer hohen Bedeutung öffentlichen Verkehrs wie etwa Stockholm oder London leichter ist, viele Nutzer für die Einführung von Straßenbenutzungsgebühren zu kompensieren, indem die Einnahmen aus der Bepreisung in den öffentlichen Verkehr fließen.

**Abbildung 9: Zerschneiden des Gefangenendilemmas**



## 6. Fazit

Innenstädte haben weltweit zunehmend mit Staus und den bekannten Folgen zu kämpfen. Bei individuell rationalem Verhalten der Verkehrsteilnehmer sind Staus oftmals unvermeidlich, da im innerstädtischen Verkehr das durchschnittliche Verkehrsverhalten ein user-equilibrium provoziert, welches gerade im Stau liegt. Dieser gleichgewichtige Zustand bewirkt, dass die Akteure in ein soziales Dilemma gezwungen werden, dem sie ohne externe Hilfe nicht entkommen können. Externe Hilfe in Form geeigneter wirtschaftspolitischer Maßnahmen kann ein derartiges soziales Dilemma mindern oder sogar zerstören. Daher wurden ausgehend von einem Status quo und einem tief im Stau liegenden Gleichgewicht aktuell diskutierte Maßnahmen und ihre Wirkungsweise auf den Stau untersucht. Es zeigte sich dabei, dass die Einführung von Straßenbenutzungsgebühren und die Verbesserung des ÖPNV massive Stauentlastungen bis hin zur Stauvermeidung (bei geeigneter Wahl der Gebührenhöhe) ermöglichen. Dem entgegen verfehlen Kapazitätsausweitungen aufgrund des erwarteten induzierten Verkehrs erhoffte Staulenkungswirkungen.

## Abstract

The article investigates users' inner city travel behaviour. Using a game theoretical framework it can be shown that individual rationality leads to a user-equilibrium that not only implies congested roads but also a prisoners' dilemma. Without external efforts, the users are unable to solve this dilemma. Hence, different economic measures as capacity extensions, road pricing or improvements of public transport are analysed within the given framework. It is shown that road pricing and improvement of public transport as accompanying measure are able to minimize or even break the prisoners' dilemma whereas capacity extension has no impact on congestion reduction because of induced traffic.

## Literatur

- Abboud, L., Clevstrom, J. (2006), Stockholm's traffic buster, in: *The Wall Street Journal*, Vol. XXIV, No. 147, 29.8.2006, S. 2.
- Armelius, H., Hultkrantz, L. (2005), The Politico-Economic Link Between Public Transport and Road Pricing: An Ex-Ante Study Of The Stockholm Road-Pricing Trial, in: Working Paper Series, Örebro University, Working Paper No. 8, 2005.
- Arnott, R. (2001), The Economic Theory of Urban Traffic Congestion: A Microscopic Research Agenda, Paperpräsentation beim Workshop on Environmental Economics and the Economics of Congestion: Coping with Externalities, Venice International University, San Servolo, July 18-19, 2001.
- Aschauer, D. (1989), Is Public Capital Expenditure Productive?, in: *Journal of Monetary Economics*, 23, S. 177-200.
- Axelrod, R. (2000), *Die Evolution der Kooperation*, Oldenbourg, München.
- Baum, H. (1971), *Grundlagen einer Preis-Abgabenpolitik für die städtische Verkehrsinfrastruktur*, Buchreihe des Instituts für Verkehrswissenschaft an der Universität zu Köln, Band 28, Köln.
- Baum, H., Behnke, N.C. (1997), *Der volkswirtschaftliche Nutzen des Straßenverkehrs*, in: Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie, Köln.
- Baum, H., Geißler, T. und Schneider, J. (2005), *Pkw-Maut für Deutschland? – Eine kritische Analyse*, Studie für den Verband der Automobilindustrie (VDA) e.V., Frankfurt a.M..
- Baum, H., Kurte, J. (1999), *Wachstums- und Beschäftigungseffekte des Verkehrs*, Deutsches Verkehrsforum, Köln.
- Bauriedl, S., Winkler, M. (2004), Typisierung europäischer Regionen auf ihrem Weg zu nachhaltiger Entwicklung, in: *NEDS Working Papers*, No. 4, 08/04, Hamburg.
- Beesley, M.E. (1965), The Value of Time Spent in Travelling: Some New Evidence, in: *Economica*, 32, 16, May, S. 174-185.
- Berg, H., Cassel, D. und K.-H. Hartwig (2003), *Theorie der Wirtschaftspolitik*, in: *Vahlens Kompendium der Wirtschaftstheorie und Wirtschaftspolitik*, Band 2, 8. Auflage, München, S. 171-296.
- Binmore, K. (1992), *Fun and Games – A Text on Game Theory*, D.C. Heath and Company, Lexington, MA.
- Braess, D. (1968), Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung, in: *Unternehmensforschung*, 12, S. 258-268.

- Brownstone, D., Small, K.A. (2005), Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstration, in: *Transportation Research Part A*, 39, S. 279-293.
- Calfee, J., Winston, C. (1998), The value of automobile travel time: implications for congestion policy, in: *Journal of Public Economics*, 69, S. 83-102.
- Dawes, R.M. (1980), Social Dilemmas, in: *Annual Review of Psychology*, 31, S. 169-193.
- DeCorla-Souza, P., Cohen, H. (1998), Accounting for induced travel in evaluation of urban highway expansion, in: *Transportation Research Board, 77<sup>th</sup> Annual Meeting*, 1998.
- De Palma, A., Lindsey, R. (2006), Modelling and evaluation of road pricing in Paris, in: *Transport Policy*, 13, S. 115-126.
- De Palma, A., Lindsey, R. und E. Niskanen (2006), Policy insights from the urban road pricing case studies, in: *Transport Policy*, 13, S. 149-161.
- De Palma, A., Lindsey, R. und S. Proost (2006), Research challenges in modelling urban road pricing: An overview, in: *Transport Policy*, 13, S. 97-105.
- Downs, A. (1962), The Law of Peak-Hour Traffic Congestion, in: *Traffic Quarterly*, 16, S. 393-409.
- Dupuit, J. (1844), On the measurement of the utility of public works, in: *Annales des Ponts et Chaussées, Memoires et Documents 2<sup>nd</sup> Series*, 8, S. 332-375, übersetzt durch: Barback, R.H. (1952), in: *International Economic Papers*, 2, S. 83-110.
- Eichinger, A., Knorr, A. (2004), Congestion Charging – das Beispiel Londons. Ökonomische Grundlagen und Zwischenbilanz, in: *Internationales Verkehrswesen*, 9/2004, S. 366-371.
- Eisenkopf, A. (2002), Effiziente Straßenbenutzungsabgaben – Theoretische Grundlagen und konzeptionelle Vorschläge für ein Infrastrukturabgabensystem, in: Aberle, G. (Hg.), *Giessener Studien zur Transportwirtschaft und Kommunikation*, Band 17, Universität Gießen.
- Evans, A.W. (1992), Road congestion pricing: When is it a good policy?, in: *Journal of Transport Economics and Policy*, 26, S. 213-243.
- Frank, D., Sumpf, J. (1997), Abschätzung der volkswirtschaftlichen Verluste durch Stau im Verkehr, BMW-Studie, München.
- Gomez-Ibanez, J.A. (1992), The political economy of highway tolls and congestion pricing, in: *Transportation Quarterly*, 46, S. 343-360.
- Gramlich, E.M. (1994), Infrastructure Investment: A Review Essay, in: *Journal of Economic Literature*, 32, S. 1176-1196.
- Hamburger, H. (1973), N-person Prisoner's Dilemma, in: *Journal of Mathematical Sociology*, 3, S. 27-48.

- Hartwig, K.-H., Armbrrecht, H. (2005), Volkswirtschaftliche Effekte unterlassener Infrastrukturinvestitionen – Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie, des Hauptverbandes der Deutschen Bauindustrie und des Verbandes der Automobilindustrie, Berlin
- Heng, S. (2000), Ökonomische Betrachtungen zum Straßenverkehr. Die Modellierung der Verkehrsproblematik in der Bundesrepublik Deutschland, in: Schriftenreihe volkswirtschaftliche Forschungsergebnisse, Bd. 61, Kovac, Hamburg.
- Hensher, D.A., Stopher, P.R. (Hg.) (1979), Behavioural travel modelling, Croom Helm, London.
- Hollander, Y., Prashker, J.N. (2006), The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis, in: Transportation, 33, S. 481-496.
- INFRAS, IWW (2004), External Costs of Transport. Update Study, Final Report, Zürich, Karlsruhe, Oktober 2004.
- Jakubowski, P., Knitschky, G., Lehmann, C. und H. Tegner (1998), Motive und Ursachen von Personenmobilität verstehen, Münster.
- Jones, P. (1998), Urban road pricing: public acceptability and barriers to implementation, in: Button, K.J. und E.T. Verhoef (Hg.), Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment, Issues of Efficiency and Social Feasibility, Cheltenham, Northampton.
- Joshi, M.S., Joshi, V. und R. Lamb (2005), The Prisoners' Dilemma and city-centre traffic, in: Oxford Economic Papers, 57, S. 70-89.
- Kossak, A. (2004), Straßenbenutzungsgebühren, in: Internationales Verkehrswesen, 56, 12/2004, S. 536-540.
- Krause, T. (2003), Dynamische Straßenbenutzungsgebühren zur Reduzierung von Staus, in: Hasenkamp, G. et al. (Hg.), Volkswirtschaftliche Analysen, Band 10, Frankfurt/Main u.a.O.
- Lawton, R., Parker, D., Manstead, A. und S. Stradling (1997), The role of affect in predicting social behaviors: The case of road traffic violations, in: Journal of Applied Social Psychology, 27, S. 1258-1276.
- Layard, R. (1977), The distributional effects of congestion taxes, in: Economica, 44, S. 299-304.
- Lehmann, C. (1996), Die politische Ökonomie des Road Pricing, in: Ewers, H.-J. (Hg.), Vorträge und Studien aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster, Heft 30, Göttingen.

- Lindsey, C.R., Verhoef, E.T. (2000), Traffic Congestion and Congestion Pricing, in: Tinbergen Institute Discussion Paper, TI 2000. 101/3, Tinbergen Institute for economic research of the Erasmus Universiteit Rotterdam, Universiteit van Amsterdam and Vrije Universiteit Amsterdam.
- Link, H. (2002), The Pilot Accounts for Germany, UNITE Deliverable 5, Ann. 1.
- Link, H., Dodgson, J.S., Maibach, M. und M. Herry (1999), The Costs of Road Infrastructure and Congestion in Europe, in: Müller, W., Bihn, M. (Hg.), Contributions to Economics, Heidelberg, New York.
- Marner, T. (2004), Die Problematik innerstädtischer Staus: ein spieltheoretischer Ansatz, in: Armbrrecht, H. u.a., Politische Weichenstellungen für den Verkehr: Verkehrsplanung, Bepreisung, Deregulierung. Vorträge und Studien aus dem Institut für Verkehrswissenschaft and der Universität Münster, Heft 41, Göttingen 2004, S. 61-108.
- Marte, G. (2005), Die Bewertung des induzierten Verkehrs – ein Verfahrensvergleich, in: Internationales Verkehrswesen, 11/2005, S. 491-494.
- May, A.D., Nash, C.A. (1996), Urban Congestion: A European Perspective on Theory and Practice, in: Annual Review of Energy Environment, 21, 239-260.
- Mayeres, I., Ochelen, S. und S. Proost (1996), The Marginal External Costs of Urban Transport, in: Transportation Research D: Transport and Environment, 1, 2, December, S. 111-130.
- McCain, R. (2003), Game Theory: A Non-Technical Introduction to the Analysis of Strategy, South-Western Educational Publishing, Belmont, CA.
- Näätänen, R., Summala, H. (1976), Road user behaviour and traffic accidents, Elsevier, Amsterdam.
- Newbery, D. (1990), Pricing and congestion: economic principles relevant to pricing roads, in: Oxford Review of Economic Policy, Vol. 6, No. 2.
- Olszewski, P., Xie, L. (2005), Modelling the effects of road pricing on traffic in Singapore, in: Transportation Research Part A, 39, S. 755-772.
- Oort, C.J. (1969), The Evaluation of Travelling Time, Journal of Transport Economics and Policy, 3, September, S. 279-286.
- o.V. (2006a), Mailand steht City-Maut bevor, in: DVZ Nr. 99 vom 19.8.2006, S. 2.
- o.V. (2006b), Transporteure machen sich Luft, in: DVZ Nr. 113 vom 21.9.2006, Spezial: City-Maut Mailand, S. 7.
- Pigou, A.C. (1920), The Economics of Welfare, first edition, Macmillan, London.
- Proost, S., van Dender, K. (1999), TRENEN II Stran – Final Report for Publication, Leuven.

- Proost, S., Sen, A. (2006), Urban transport pricing reform with two levels of government: A case study of Brussels, in: *Transport Policy*, 13, S. 127-139.
- Prud'homme, R., Bocajero, J.P., The London congestion charge: a tentative economic appraisal, in: *Transport Policy*, 12, 3, 2005, S. 279-287.
- Rasmusen, E. (1994), *Games and Information. An Introduction to Game Theory*, 2nd ed., Blackwell, Malden, MA.
- Recker, W.W., Golob, T.F. (1976), An attitudinal modal choice model, in: *Transportation Research*, 10, S. 299-310.
- Sansom, T., Nash, C., Mackie, P., Shires, J. und P. Watkiss (2001), *Surface Transport Costs and Charges. Great Britain 1998, Final Report for the Department of the Environment, Transport and the Regions*, Institute for Transport Studies, University Of Leeds, Leeds, July 2001.
- Santos, G., Bhakar, J. (2006), The impact of the London congestion charging scheme on the generalised costs of car commuters to the city of London from a value of travel time savings perspective, in: *Transport Policy*, 13, 2006, S. 22-33.
- Schelling, T. (1978), *Micromotives and Macrobehavior*, Norton and Company, New York, London.
- Schrage, A. (2005), Straßenmaut und Verkehrsstaus, in: Sinn, H.-W., Fuest, C. (Hg.), *Beiträge zur Finanzwissenschaft*, 19, Tübingen.
- Selten, R. (2001), What Is Bounded Rationality?, in: Gigerenzer, G./Selten, R. (Hg.), *Bounded Rationality, The Adaptive Toolbox*, MIT Press, Cambridge u.a.O., S. 13-36.
- Simon, H.A. (1957), *Models of Man*, Wiley, New York.
- Small, K.A., Winston, C. und C.A. Evans (1989), *Road Work – A New Highway Pricing and Investment Policy*, Washington, D.C.
- Steg, L. (2003), Factors Influencing the Acceptability and Effectiveness of Transport Pricing, in: Schade, J., Schlag, B. (Hg), *Acceptability of Transport Pricing Strategies*, Amsterdam u.a.O., S. 187-202.
- Steg, L., Vleg, C. und G. Slotegraaf (2001), Instrumental-reasoned and symbolic-affected motives for using a motor car, in: *Transportation Research F*, 4, 2001, S. 151-169.
- Sumalee, A. (2004), Optimal road user charging cordon design: A heuristic optimization approach. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19, S. 377-392.
- Teubel, U. (2001), *Road Pricing – Effizient aber unsozial?*, Frankfurt a.M.
- Transport for London (2004), *Greater London Authority Act 1999. Transport Act 2000. The Greater London (Central Zone) Congestion Charging Order. Instrument of Confirmation 2004*, London.

- Transport for London (2006), Central London Congestion charging, Impacts monitoring, Fourth Annual Report, Overview, June 2006, London.
- Transport Research Laboratory (1996), The Use of Traffic Signals in Developing Cities, in: Overseas Road Note, 13, Overseas Centre, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Tucker, A.W. (1983), The Mathematics of Tucker: A Sampler, A Two-Person Dilemma: The Prisoners Dilemma, in: The Two Year College Mathematics Journal, 14, 3, S. 228-232.
- Van Vugt, M., Meertens, R.M., Van Lange, P.A.M. (1995), Car versus public transportation? The role of social value orientations in a real-life social dilemma, in: Journal of Applied Social Psychology, 25, S. 258-278.
- Verkehrsbetriebe STI (2006), Mobilität im Berner Oberland, Zahlen und Fakten 2005, Thun.
- Vickerman, R.W. (2000), Economic Growth Effects of Transport Infrastructure, in: Jahrbuch für Regionalwissenschaft, 20, S. 99-115.
- Vickrey, W. (1969), Congestion Theory and Transport Investment, in: American Economic Review, 59, May 1969, No. 2, S. 251-260.
- Vold, A. (2006), Phased implementation of transport pricing for Greater Oslo, in: Transport Policy, 13, S. 140-148.
- Walters, A.A. (1961), The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, in: Econometrica, 29, 4, October, S. 676-699.
- Walters, A.A. (1968), The Economics of Road User Charges, in: World Bank Staff Occasional Papers, Vol. 5, International Bank for Reconstruction and Development, John Hopkins Press, Baltimore, MD.
- Yang, H., Huang, H.-J. (2005), Mathematical and Economic Theory of Road Pricing, Elsevier, Amsterdam u.a.O.
- Ziegler, G.M. (2005), Was denkt der Mathematiker im Stau?, Notizen aus der MATHEON-Lounge, in: DMV-Mitteilungen, 13-2, S. 106-108.

## Cost-Benefit Analyses of Intelligent Vehicle Safety Systems – Some Empirical Case Studies –

BY HERBERT BAUM, TORSTEN GEIßLER, SÖREN GRAWENHOFF  
AND WOLFGANG H. SCHULZ, COLOGNE

### 1. Introduction

Intelligent Vehicle Safety Systems (IVSS) increase the effectiveness of the transport system by improving road safety, traffic flow and comfort for the transport system users. Several systems have already proven these effects. Others are promising in trials but have not yet been implemented on a large enough scale to show their potential. In order to accomplish a high effectiveness of the systems and to contribute significantly to increased safety, the European Commission promotes the implementation of IVSS. Socio-economic impact assessment is an important driver for acceptance and implementation of the applications. The balance of costs and benefits of relevant IVSS – those IVSS that can be expected to have a significant impact in the next 10-15 years – will be the basis for the development of a roll-out strategy for IVSS, by

- increasing the interests of the industry to produce the systems and bring them onto the market,
- strengthening the willingness-to-pay of the users, and
- providing arguments for a political promotion strategy.

The underlying study was motivated by the recommendations of the eSafety working group on road safety (eSafety 2002) which pointed out the necessity to estimate the socio-economic benefits of IVSS as one important action to reduce or remove societal barriers for the implementation of the systems. Therefore, beyond methodological development it was also important to demonstrate the workability of the approach suggested in SEiSS (2005) and to verify it by some case studies.

---

*Authors' address:*

Prof. Dr. Herbert Baum  
Dr. Torsten Geißler  
Dr. Sören Grawenhoff  
Institute for Transport Economics at the University of Cologne  
Universitätsstr. 22  
50923 Cologne, Germany  
e-mail: h.baum@uni-koeln.de

Prof. Dr. Wolfgang H. Schulz  
Europa-Fachhochschule Fresenius  
für Wirtschaft und Medien  
Im Mediapark 4c  
50670 Cologne, Germany  
e-mail: wh.schulz@fh-fresenius.de

This article is based on the final report of the SEiSS study: VDI/VDE-IT, Institute for Transport Economics at the University of Cologne, Exploratory study on the socio-economic impact of the introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles, Teltow and Cologne 2005. The full report is available at [www.esafetysupport.org](http://www.esafetysupport.org). Financial support from the European Commission, DG Information Society and Media, is gratefully acknowledged.

It must be borne in mind that the socio-economic impact assessment must occasionally cope with data limitations, namely on EU-25 level. This can also affect the accuracy of its calculations. The proposed SEiSS methodology thus provides a framework for impact assessment which can be filled according to the level of available information.

The general intention for the case study selection was that promising applications for the market segment of passenger cars with significant expected socio-economic benefits should be preferred for analysis against niche systems with limited applicability. Based on this principle, the following IVSS were selected for the exemplary calculations:

- eCall,
- Safe Following – Adaptive Cruise Control (ACC),
- Lane Change Assistant and Lane Departure Warning (LCA/LDW).

The paper is organised as follows. Chapter 2 provides a short overview over the proposed methodology and defines the common assessment framework for the case studies. The following chapters 3 to 5 comprise the three case studies itself. Chapter 6 resumes some general insights drawn from the case studies.

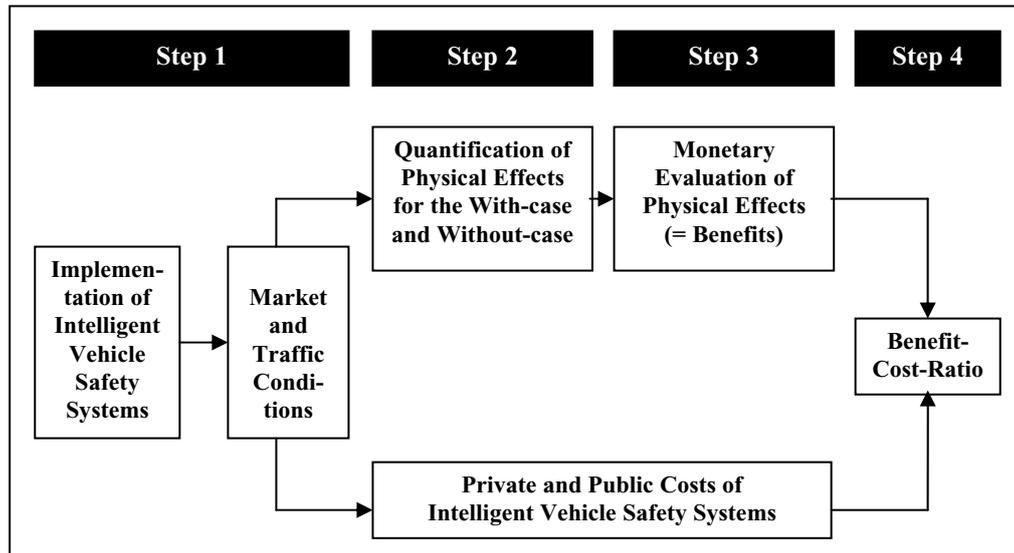
## 2. Analytical Framework

### 2.1 Cost-benefit analysis as underlying assessment methodology

A widespread approach for assessing the potential socio-economic impact is the welfare economics-based cost-benefit analysis (CBA). The favourability of Intelligent Vehicle Safety Systems from the society point of view can be illustrated by confronting the socio-economic benefits with the system costs (investment, operating and maintenance costs). Benefit-cost ratios of more than 1 indicate the public profitability of system deployment.

The evaluation steps for performing a full benefit-cost analysis of Intelligent Vehicle Safety Systems are represented in figure 1. The CBA consists of a four step calculation procedure which can be characterised as follows:

- Within the first step, the system characteristics and functionalities have to be comprehensively specified. This specification work is important for any kind of impact analysis, because it determines the data needs. It includes the description of the system components as well as the behaviour of the system in real traffic situations. With the description of the functional range (e.g. sensor range, reaction time, functional limitations) it is possible to determine the road types (e.g. motorway, trunk roads, rural roads, urban roads) where the system can be applied. Additionally, the equipped vehicle categories (e.g. passenger cars, trucks, only new vehicles, only used vehicles) and the expected equipment rate have to be determined.



**Figure 1: Steps of monetary evaluation of Intelligent Safety Systems (own figure)**

- In the second step the physical effects of IVSS have to be quantified. They are decisive for the question whether the IVSS usage leads to overall benefits or not, because they determine how the economic factor resources of traffic (i.e. time, energy, accidents, environment) are affected by IVSS. Conceptually, the main effect of IVSS is the reduction of hazardous situations and hence the safety impact. Hazardous situations which normally lead to accidents will be defused by system use. Hence, it will be possible that the number and/or the severity of accidents can be avoided. As a consequence, accident costs can be lowered. Avoiding accidents is furthermore related to additional traffic effects, because congestion due to accidents can be lowered too. Avoiding congestion then reduces time and vehicle-operating costs, emission and CO<sub>2</sub>-costs. These socio-economic impacts are also addressed by non-safety critical effects which may play as side effects a considerable role with respect to the overall economic benefits. An overview over the relevant impact channels is given in figure 2.
- In the third step, altogether the change of safety and traffic parameters reflect themselves in the time-, vehicle operating-, accident and emission costs for both road freight transport and passenger transport. To get the benefits of IVSS it is necessary to define two possible cases (with-case: IVSS will be introduced and without-case: no introduction of IVSS). The difference between the costs of the without-case and the with-case is the benefit of IVSS. This approach to determine social benefits is called the cost-savings approach. The evaluation of the costs has to be done for every year of the life-cycle of IVSS. The annual social benefits over the life cycle of IVSS will be summed

up and then the total sum of benefits will be transformed by the discount rate to one actual value of social benefit for the starting date of the traffic measures.

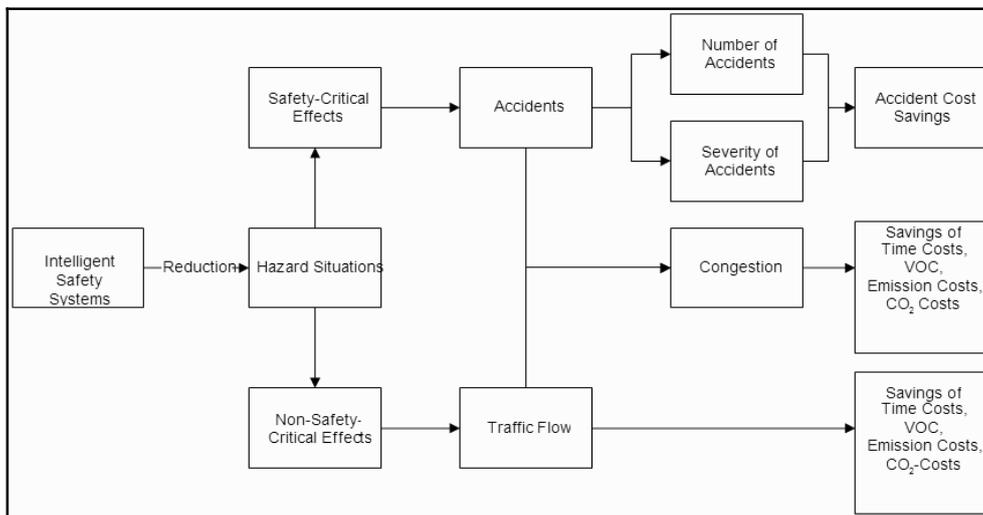
Beside the benefit evaluation the costs of IVSS have to be determined. The costs of IVSS cover thereby the capital outlays, the operating costs and also further costs, if additional expenditures (e.g. costs for supplemental equipment of road infrastructure, implementation of a traffic guidance centre) are necessary for the functioning of IVSS.

- Within the fourth step the benefit-cost ratio can thus be expressed as follows:

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^{T-1} B_t(1+i)^{-t}}{\sum_{t=0}^{T-1} C_t(1+i)^{-t}}$$

Where  
 BCR := benefit-cost ratio  
 T := time horizon pre-defined  
 B<sub>t</sub> := benefits estimated for the year t  
 C<sub>t</sub> := costs estimated for the year t  
 i := discount rate

Setting absolute numbers of costs and benefits into relation, the BCR is a reliable indicator of cost-effectiveness of IVSS. This proceeding implies information about the economic objective of maximisation/minimisation of benefits/costs and helps to avoid false decisions and investments which can not be justified from the society point of view.



**Figure 2: System Impact Channels (own figure)**

The common elements of the three case studies – specification, applied impact channels, database for impact assessment and the cost-unit rates for impact assessment will be discussed in the next sections.

## 2.2 System specification and base assumptions

The selected IVSS cover different specifics which are relevant in the context of impact assessment. They address diverse crash-related driving phases as well as different accident types. Moreover, the market deployment plans are dependent on the specific system. Table 1 provides an overview of the business and traffic environment for the selected IVSS.

<b>Criteria</b>	<b>IVSS</b>	<b>eCall</b>	<b>Safe Following (ACC)</b>	<b>Lane Change Assistance and Lane Departure Warning</b>
Short Description		Manual or automatic in-vehicle emergency call system	System for distance maintenance and (optionally) speed adaptation	System for lateral assistance in cases of lane changes and unintended lane departure
Safety Objective		Accident severity reduction	Convenience	Accident avoidance and accident severity reduction
Relevant Accident Types		All	Rear end collisions	“Left roadway” accidents, side impacts, head-on collisions
Safety Mechanism		Faster rescue chain	Distance maintenance	Obstacle and lane detection and interaction with driver
Driver Interaction		Manual and Automatic	Semi-Automatic	Driver
Relevant Driving Situations		---	Longitudinal	Lateral
Crash-Related Driving Phase		Post-crash	Driving – Warning – Assistance	Warning – Assistance
Market Deployment		100%, from 2006 onwards	Introduced, innovation cascade (from luxury cars to lower segments)	Introduced in HGV, beginning in cars
Reference Years for Socio-Economic Impact Assessment		Based on 2002	2010 / 2020	2010 / 2020
Geographical Coverage		EU-25	EU-25	EU-25

**Table 1: Business and Traffic Environment for IVSS Impact Case Studies (own compilation)**

2.3 Applied impact channels and database for impact assessment

Intelligent Vehicle Safety Systems can have several impacts in road traffic. An overview over the applied impact channels is given in table 2.

Applied impact channels	Case Study	eCall	Safe Following (ACC)	Lane Change Assistance and Lane Departure Warning
	Safety	Number of accidents	---	X
Severity of accidents		X	X	X
Congestion caused by accidents		X	X	X
Traffic Flow		---	---	---

**Table 2: Applied Impact Channels (own compilation)**

Constitutional for safety systems is the safety impact. This impact channel will be applied to all of the case studies. The safety impact is further differentiated between the impact on the number of accidents (accident avoidance) and the impact on the severity of accidents (mitigation of the accidents consequences). This differentiation is motivated by the fact that IVSS address different time slots in an accident causation process. Basically, it can be distinguished between the phases normal driving, warning and assistance, pre-crash, in-crash and post-crash. ACC works in the first two phases and assists the driver in keeping a safe distance to its predecessor. Lane Change Assistance and Lane Departure Warning is also a system which acts in the warning and assistance phase. Both systems, ACC and the combined LCA/LDW have therefore potential in accident avoidance as well as in mitigation. This is different for the third system which is investigated here. eCall is a system which aims at optimising the rescue chain once a crash has happened. Hence, eCall represents a post-crash system. It can not avoid any accident but it can help to bring the rescue services faster to the accident site. So, there are effects on accident severity because serious injuries are treated earlier whereas the avoidance channel is not applicable for eCall.

A common impact channel for all investigated systems is the reduction of accident caused congestion. When accidents are avoided or medical treatment can be provided earlier, congestion can be reduced. This impact represents an add-on to the safety impact. It is applicable for all systems.

Other impacts such as traffic flow effects are not applied here. They are not relevant for eCall and LCA/LDW. They could be relevant for ACC which helps to maintain a safe distance between vehicles. However, traffic simulation models have shown that diffusion rates of less than 10-20% show very few changes in traffic characteristics, irrespective of the system specification and the modelling assumptions (DIATS 1999).

The impact assessment has to build upon general accident data for all 25 member states of the European Union. Table 3 shows for each member state the number of road accidents, the fatalities, the severe and the slight injuries.

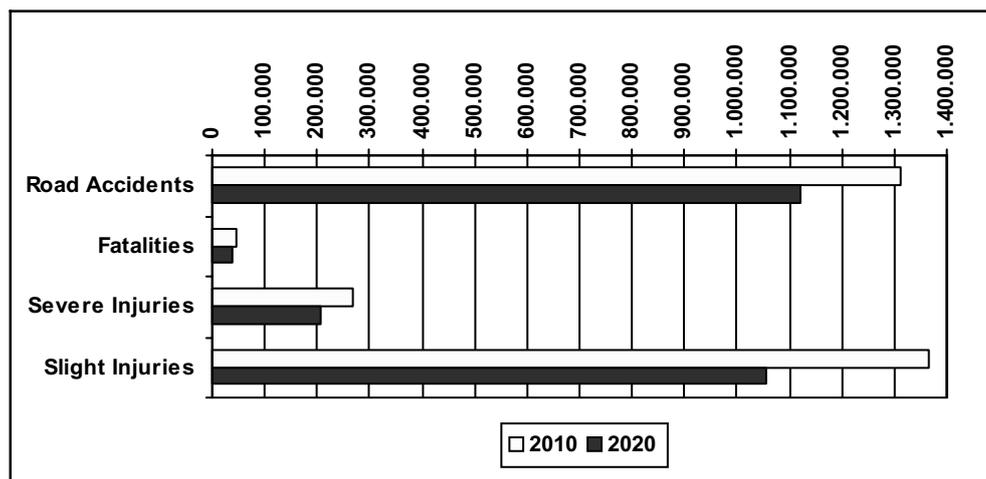
EU-Member States		Number of			
		Accidents	Killed People (Fatalities)	People with Severe Injuries	People with Slight Injuries
Belgium	BE	47,444	1,486	8,949	56,345
Denmark	DK	6,856	431	3,946	4,703
Germany	DE	362,054	6,842	88,382	388,031
Greece	EL	19,671	1,880	3,238	23,098
Spain	ES	100,393	5,516	27,272	120,761
France	FR	105,470	7,655	24,091	113,748
Ireland	IE	6,909	412	1,417	7,794
Italy	IT	204,615	6,314	41,138	290,575
Luxembourg	LU	1,016	60	440	750
Netherlands	NL	42,271	1,090	12,388	29,664
Austria	AT	43,175	956	8,043	42,180
Portugal	PT	41,642	1,655	4,690	51,175
Finland	FI	6,196	415	8,156	n/a
Sweden	SE	157,96	583	4,058	20,155
United Kingdom	UK	227,108	3,431	37,514	263,198
Czech Republic	CZ	26,586	1,431	5,520	28.171
Estonia	EE	2,164	223	470	2.399
Cyprus	CY	2,370	98	578	2.950
Latvia	LV	5,083	518	1,033	5.270
Lithuania	LT	6,090	697	1,217	6.213
Hungary	HU	19,686	1,429	3,959	20.202
Malta	MT	1,312	16	212	1.083
Poland	PL	53,559	5,827	9,276	47.336
Slovenia	SI	10,266	269	2,361	12.050
Slovakia	SK	7,866	610	1,777	9.067
<b>Total EU 25</b>		<b>1,365,598</b>	<b>49,844</b>	<b>300,126</b>	<b>1,546,918</b>

**Table 3: Number of Road Accidents and Casualties in EU-25 for 2002 (CARE 2004; IRTAD 2004)**

In order to carry out a prospective assessment for the years 2010 and 2020, the development of road safety has to be forecasted. Over the last decade, the decade in which most IVSS were developed, road safety in the EU-15 has been continuously improved. The number of road fatalities has been reduced from 56,027 (1991) to 39,849 (2001). This is equivalent to an annual reduction of 3.3%. However, due to the traffic growth of 1.8% per year, the safety performance (fatalities per billion vehicle kilometres) has improved by as much as 5.1%. For the future, the following reduction can be conservatively assumed:

- The number of accidents should decrease by 2% per year,
- The number of casualties (fatalities, severe and slight injuries) should decrease by 3% per year.

Based on this assumption the forecasted accidents and casualties for the years 2010 and 2020 can be calculated. Figure 3 shows the results for the EU-25.



**Figure 3: Forecast for Number of Road Accidents and Casualties in the EU-25 in 2010 and 2020 (CARE 2004, ProgTrans 2004, author’s calculation)**

2.4 Cost-unit rates for impact assessment

The cost-unit rates for impact assessment show European average values for the monetary evaluation of safety impacts and the related congestion reduction. Table 4 provides an overview over the applied cost unit rates:

- The cost-unit rates for the casualties apply values which were proposed by the European Commission itself (EC 2003): 1,000,000 € per fatality, 135,000 € per severe injury and 15,000 € per slight injury.

- Obviously, not only casualties, but also accident-related property damages can be avoided. Since it exists quite a considerable range of cost unit rates reflecting property damages (CarTALK 2004), an average rate of 6,000 € per accident is applied. Note that this rate reflects property damages occurring in accidents where there are casualties. The socio-economic benefits of avoiding property damage only (PDO) accidents are not considered in this case study. Although cost unit rates exist for PDO accidents, there is a lack of reliable data on the number of PDO accidents.
- Additionally, accidents are regularly accomplished by congestion leading to time losses, higher fuel consumption, air pollution and carbon-dioxide emissions. These effects are taken into account in a general cost unit rate for different accident severities. According to a recent British study (ICF 2003), average congestion costs caused by fatal accidents amount to 15,000 €, whereas a rate of 5,000 € applies for accidents with personal injuries. The different cost unit rates reflect that, on average, congestion caused by a fatal accident lasts longer than congestion caused by a crash resulting in severe or slight injuries.

Accident Severity	Cost Unit Rates for Monetary Assessment (in €)		
	Casualties	Property Damage (per Accident)	Congestion
Fatalities	1,000,000	6,000	15,000
Severe Injuries	135,000		5,000
Slight Injuries	15,000		5,000

**Table 4:** Cost Unit Rates for the Socio-Economic Assessment of Safety Impact (EC 2003, CarTALK 2004, ICF 2003)

### 3. eCall

#### 3.1 Description of the system

The first case study is the in-vehicle emergency call system (eCall). The in-vehicle eCall is an emergency call generated either manually by vehicle occupants or automatically via activation of in-vehicle sensors. When activated, the in-vehicle eCall system will establish a voice connection directly with the relevant PSAP (Public Safety Answering Point), this being either a public or a private eCall centre operating under the regulation and/or authorisation of a public body. At the same time, a minimum set of incident data (MDS) will be sent to the eCall operator receiving the voice call (eCall MoU 2004).

eCall operates differently to other IVSS because it does not alter the vehicle collision probability, but instead affects the severity of the accident by reducing the rescue time. This means that fatalities could be avoided and that the consequences of such accidents might be reduced to severe injuries. In case of severe accidents, the effect of the reduced rescue time

might be diminished accident consequences, resulting in only slight injuries. Finally, the faster arrival of emergency medical services on the accident scene could lead to the fact that some slight injuries can be avoided.

The primary objective of the eCall case study is to work out the benefits and costs of eCall implementation at a European level (full penetration) based on the historical situation of 2002. However, the case study also contributes to the following secondary objectives:

- Although, compared to other IVSS, eCall has limited effects on road traffic costs, it can be demonstrated that the evaluation framework is appropriate to derive benefit-cost results.
- Previous benefit estimations for eCall were carried within the E-MERGE project (E-MERGE 2004) and the eCall Driving Group (eSafety 2004). A major difference exists between the accident cost unit rates used in these studies and in the present case study. It is therefore appropriate to work out the effects of different monetary terms on the benefit-cost result.

### 3.2 Market Penetration and System Costs

The eCall aims at showing the benefits and costs for an implementation of the system as it would have been implemented in the total European vehicle fleet of the year 2002. Hence, the equipment rate was assumed to be 100%. That means that 210 million passenger cars must be equipped.

Regarding system costs, the relevant cost positions are the on-board equipment, the equipment of Public Safety Answering Points (PSAP) and training costs for the PSAP staff (see table 5 for a summary of the cost assessment):

- The costs for the eCall on-board components are estimated at between 100 € and 150 €. With a depreciation period of 8 years and a discount rate of 3%, the annuity factor is 0.14. That means that annual system costs range between 3 billion € and 4.5 billion €.
- PSAP equipment costs range from 30,000 € to 50,000 € per PSAP. The number of actual PSAP in EU-25 is not given. Therefore, an empirical relationship between the number of PSAP and inhabitants is derived for Germany. This calculation shows that one PSAP is required for every 31,000 inhabitants. This takes the total number of PSAP in EU-25 to 1,500. The depreciation period for the PSAP equipment is 20 years. With a discount rate of 3%, the annuity factor is 0.067. The annual costs for PSAP equipment are between 3 million € (= 30,000 € investment costs per PSAP) and 5 million € (= 50,000 € investment costs per PSAP).
- The training costs for PSAP staff are estimated to range from 300 € to 500 € per staff member. The average number of people working at a PSAP is 60. The annual training costs therefore range from between 27 million € to 45 million €.

<b>Cost Component</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
System Costs (on-board unit)	3,000 Million €	4,500 Million €
PSAP Equipment Costs	3 Million €	5 Million €
Training Costs	27 Million €	45 Million €
<b>Total</b>	<b>3,030 Million €</b>	<b>4,550 Million €</b>

**Table 5: Annual Costs of eCall (author's calculations)**

### 3.3 Safety Impact

The eCall system makes the rescue chain more efficient. When medical care for critically (and severely) injured people is available at an earlier time after the accident, the death rate can be significantly lowered. This is known as the Golden Hour Principle of accident medicine. It expresses that, one hour after the accident, the death rate of people with heart or respiratory failure or massive bleeding approaches 100 %. This is why the rapid reaction of rescue services is very important.

Recently, the E-MERGE project approached the issue of lowering rescue times carefully. These impact estimations, which are based on surveys conducted in different Western European countries, will provide the basis for the calculation of the socio-economic impact:

- According to E-MERGE and the eCall Driving Group, 5% to 15% of road fatalities can be reduced to severe injuries and 10% to 15% of severe injuries can be reduced to slight injuries. No positive effect of eCall was expected for slight injuries (E-MERGE 2004: 49).
- Road accidents lead also to congestion. Due to a shorter rescue time, eCall will also reduce the congestion time, because the faster arrival of rescue teams, police and towing firms enables the accident scene to be cleared more quickly. Additionally, there is a reduction in congestion time of 10% in the low-impact case and 20% reduction in the high-impact case, which must also be considered.

It therefore makes sense to perform the economic evaluation for two cases, which refer to the minimum values (low impact of eCall) and the maximum values (high impact of eCall). The benefit-cost results therefore provides a range between the lowest and highest possible effects of eCall. The following table 6 gives an overview of the effects of eCall on accident severity and congestion time.

<b>Effects</b>	<b>Low Impact</b>	<b>High Impact</b>
<b>Accident Severity</b>		
Road Fatalities changed to Severe Injuries	5.0%	15.0%
Severe Injuries changed to Slight Injuries	10.0%	15.0%
<b>Reduction in Congestion Time</b>	10.0%	20.0%

**Table 6: Effects of eCall on Accident Severity and Congestion Time – Low and High impact (E-MERGE 2004; eSafety 2004)**

The accident effects of eCall at the European level differentiated for the low and high impact-cases are shown in the following table. It is clear that the reduction potential can be determined for every European member state; however, for reasons of clarity the figures for each European member state are not disclosed.

<b>Effect on Accident Severity</b>	<b>Low Impact</b>	<b>High Impact</b>
Road Fatalities changed to Severe Injuries	2,492	7,477
Severe Injuries changed to Slight Injuries	30,013	45,019

**Table 7: Reduction in Fatalities and Severe Injuries by eCall for EU-25 in 2002 (absolute numbers, author's calculation)**

### 3.4 Safety Benefits

The safety and traffic impacts can be assigned monetary values using average cost unit rates which reflect the change in accident severity. As proposed before, the following cost unit rates are used: 1,000,000 € per fatality, 135,000 € per severe injury and 15,000 € per slight injury. Because eCall leads to changes in accident severity (fatalities will be changed to severe injuries and severe injuries will be changed to slight injuries), it is necessary to use the differences between each type of accidents. That means the avoidance of one fatality leads to cost savings of 865,000 € (the result of the difference: 1,000,000 € minus 135,000 €) and the avoidance of one severely-injured person leads to cost savings of 120,000 € (the result of the difference: 135,000 € minus 15,000 €). The achievable accident cost savings are shown in the following table 8.

<b>Benefits</b>	<b>Low Impact of eCall</b>	<b>High Impact of eCall</b>
Accident Cost Savings	5,700 Million €	11,800 Million €

**Table 8: Accident Cost Savings With eCall Based on European Cost Unit Rates – EU-25 (author's calculation)**

However, the E-MERGE project and the eCall Driving Group refer to US American evidence and suggest the following international cost unit rates: 977,000 € per fatality, 502,109 € per severe injury and 93,546 € per slight injury. Following the logic of the calculation from above, avoiding a fatality leads to cost savings of 474,891 € (the result of the difference: 977,000 € minus 502,109 €) and mitigating the accident severity leads to savings of 408,153 € (the results of the difference: 502,109 € minus 93,546 €). The accident cost savings for the application of these cost unit rates are shown in the following table 9.

<b>Benefits</b>	<b>Low Impact of eCall</b>	<b>High Impact of eCall</b>
Accident Cost Savings	13,400 Million €	21,900 Million €

**Table 9: Accident Cost savings of eCall based on International Cost Unit Rates – EU-25 (author's calculation)**

Compared with the accident cost savings calculated on the basis of the European cost-unit rates it can be stated that:

- In the low impact case, the benefits based on international cost-unit rates exceed the benefits based on European cost-unit rates by 135.1%.
- For the high impact case, the international assessment exceeds the European assessment by 85.6%.

For the sensitivity analysis of both results, we need to compare the cost savings due to fatalities and severe injuries avoided (see following table 10).

<b>Benefit Components</b>	<b>European Cost-Unit Rates</b>	<b>International Cost-Unit Rates</b>	<b>Difference between International Cost-Unit Rate and European Cost-Unit Rate</b>
Avoided Fatality	865,000 €	474,891 €	-45.1%
Avoided Severe Injury	120,000 €	408,563 €	+240.5%
Arithmetic Mean	492,500 €	441,727 €	-10.3%

**Table 10: Sensitivity analysis for different cost-unit rates (author's calculation)**

The previous table shows that the international cost-unit rates compared to the European cost-unit rates underestimate the benefits of avoiding fatalities and overestimate the benefits of avoiding severe injuries. Furthermore, it is clear that the overestimation of benefits for avoiding severe injuries dominates the effect on the total accident cost savings, because the number of avoidable severe injuries is higher than the number of avoidable fatalities (for the low-impact case, the number of avoidable severe injuries is twelve times higher than the number of avoidable fatalities; for the high-impact case the number is seven times higher). For the sensitivity of the European cost-unit rates, the following average conclusions can be drawn:

- In the case of low eCall impact, a 1% increase in the cost-unit rates for avoided severe injuries will lead to an increase in benefits of 0.6%.
- For the high-impact case, a 1% increase in the cost-unit rates for avoided severe injuries results in a 0.4% increase in benefits.

In addition to its effect on accidents, eCall will also have an impact on travel time delays due to congestion caused by accidents. The fact that eCall will reach an equipment ratio of 100% in passenger cars leads first to the conclusion that the congestion caused by every single accident could be affected. On this basis a first estimation of congestion cost savings can be performed, based on following steps:

- Estimation of current time delay costs for accidents: With 1,365,598 accidents in 2002 and an average time cost unit rate for each accident of 15,000 €, the total costs of delays would amount to 20 billion €.
- eCall congestion cost savings: on average, the time delay due to accident congestion is 100 minutes. A 10% reduction of congestion time by eCall will lead to time cost savings of 2 billion €, whereas a 20% reduction of congestion time results in time cost savings of 4 billion €.

However, this calculation procedure gives an optimistic evaluation of the achievable congestion cost savings. It might be slightly unrealistic to assume that eCall can be used successfully for each accident. The assessment of the accident impacts is, for example, more conservative, because only some fatalities and severe injuries are seen as avoidable; not all. It therefore makes sense to have an alternative procedure which mirrors the conservative assessment given by the accident impact analysis. An alternative calculation of congestion cost savings has to overcome the lack of the official accident statistics. There is no evidence which relates the number of accidents to the number of fatalities or severe injuries. For example, 300,126 people have slight injuries, but the number of accidents which caused this number of casualties is undetermined. 300,126 people could have been injured in 300,126 accidents, but they could just as easily have been injured in just 100,000 accidents. Based on the findings of the accident impact analysis, the following impact of eCall on congestion can be derived:

- At low impact, congestion caused by accidents can be reduced by 15%, which leads to congestion cost savings of 170 million €.
- At high impact, congestion caused by accidents is affected by 30%, which leads to congestion cost savings of 469 million €.

### 3.5 Benefit-Cost Results for eCall

In a final step, the annual benefits have to be confronted with the annual costs. The results are presented in the following table. To obtain the possible range of benefit-cost ratios, the benefits from a low impact of eCall must be compared with the maximum value of costs which can be expected (= Scenario A) and the benefits from a high impact of eCall must to be linked to the minimum value of costs (= Scenario B). This gives us a range of attainable benefit-cost ratios of between 1.3 and 8.5, which represents the combined consideration of the “pessimistic view” and the “optimistic view” for final recommendations of eCall.

<b>Annual Benefits</b>	<b>Scenario A</b>	<b>Scenario B</b>
Accident Cost Savings	5,700 Million €	21,900 Million €
Congestion Cost Savings	170 Million €	4,000 Million €
<b>Total Benefits</b>	<b>5,870 Million €</b>	<b>25,900 Million €</b>
<b>Annual Costs</b>	<b>Scenario A</b>	<b>Scenario B</b>
System Costs	4,500 Million €	3,000 Million €
PSAP Equipment Costs	5 Million €	3 Million €
Training Costs	45 Million €	27 Million €
<b>Total Costs</b>	<b>4,550 Million €</b>	<b>3,030 Million €</b>
<b>Benefit-Cost Ratio</b>	<b>1.3</b>	<b>8.5</b>

**Table 11: Benefit-Cost Results of eCall (author’s calculation)**

The “pessimistic view”, with 1.3 as the benefit-cost ratio for eCall, shows that, even with a low success rate and high cost figures, the introduction of eCall is justified, because the resource savings exceed the costs. This means that eCall would, even under pessimistic assumptions and hypotheses, contribute to the welfare of the EU-25.

The “optimistic view” shows that in the best case, which means that system efficiency is reached and costs are minimised due to economies of scale, society can expect to see a benefit of 8.5 € for every 1 € spent on eCall.

## 4. Safe Following – ACC

### 4.1 Description of the system

Adaptive Cruise Control (ACC) will enable the vehicle to maintain a driver-defined distance from the preceding vehicle while driving within a maximum speed limit – again set by the driver. Since the system only functions at speeds between 30 km/h and 200 km/h, it is designed primarily for use on motorways and rural roads. If, however, there is a rapid reduction in the vehicle’s speed, the system will warn the driver and switch off to let the driver assume control.

In order to carry out a benefit-cost analysis of the safety impacts of ACC, several different pieces of information are needed:

- The costs of ACC and their equipment rates for target years (here: 2010 and 2020),
- The number of relevant accidents (= accidents, which could possibly be avoided using IVSS),
- The efficiency in avoiding these relevant accidents,
- The societal costs of accidents.

#### 4.2 Market Penetration and System Costs

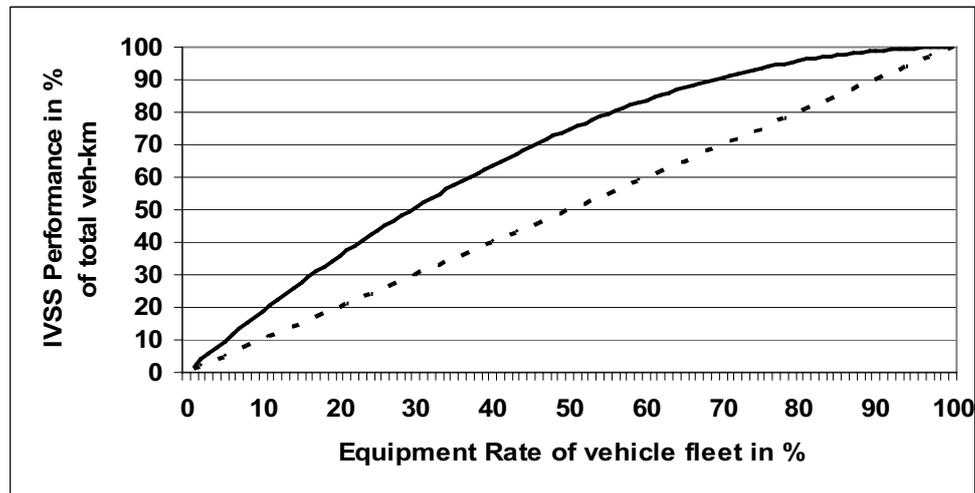
The costs and market penetration rates were forecast based on market analyses from different research institutes. Additionally, expert interviews were carried out in order to verify the data from the different market studies. These interviews were conducted with two suppliers of intelligent vehicle safety systems and one independent expert. Based on this information, it is assumed that 3% of all cars will be ACC-equipped by the year 2010. By 2020, the diffusion rate will have increased to 8%. The costs are forecast at 750 € per unit in 2010 and 400 € per unit in 2020 (see following table).

<b>ACC (EU-25)</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>
Vehicle Stock (in million cars)	239.1	261.2
Market Diffusion Rate in %	3%	8%
Consumer Price per Unit	750 €	400 €

**Table 12: Equipment Rate and Consumer Price per Unit of ACC for 2010 and 2020 (ProgTrans 2004, author's calculation)**

With this information, system costs which represent the denominator of the benefit-cost ratio must be assessed. As stated above, the consumer price per unit equals 750 € in 2010 and 400 € in 2020. The average economic lifetime of a car in EU-15 amounts to 11.4 years. Since the average age of the vehicle fleet in the new member states is 50% higher than in EU-15, an average economic lifetime of 12 years is a conservative assumption. Using this figure, the annual costs of equipping vehicles with ACC amount to in total 540 million € in 2010 and 840 million € in 2020.

These diffusion rates reflect actually a very slow diffusion process. Although in 2020, more than 20 million cars will be equipped with ACC, the diffusion will still be below 10%. From an economic point of view, it is obvious that implementing ACC is of greatest benefit to those drivers with the highest vehicle kilometres per year. The reason for this is that the statistical risk of an accident is correlated with vehicle kilometres. Drivers with high vehicle kilometres are therefore more exposed to the risk of an accident than those with lower vehicle kilometres. The ACC performance on roads as a function of market penetration can thus be described as a monotonous increasing function with regressive growth. This is shown in figure 4 by the solid line. For comparison, the dotted line indicates constant growth (which means linear correlation). The functional relationship shows that about 6% of vehicle kilometres can be reached with 3% market diffusion (scenario A). For 15% of vehicle kilometres, market diffusion of 8% is sufficient. The regressive growth becomes apparent with higher equipment rates.



**Figure 4:** Correlation between Market Diffusion and ACC Performance (author's figure)

#### 4.3 Safety Impact

The improvement in safety is the combined result of two different effects: a reduction in accident numbers and a reduction in accident severity. The reduction in accident severity occurs due to the fact that not all accidents can be avoided entirely through the use of IVSS. The safety improvement is conditioned by several parameters:

- ACC influences rear-end collisions. Rear-end collisions are a frequent type of accident on European roads. An in-depth study of rear-end collisions for ten countries of EU-15 (SWOV 2003) based on CARE data has shown that rear-end collisions account for an average of 13% of all accidents. In this analysis, this average is applied to all the countries which are not covered by the study due to data limitations (Denmark, Luxembourg, Finland and the United Kingdom). Rear-end collisions in Germany account for 13% of all accidents (Statistisches Bundesamt 2003). Due to a lack of data for the new member states, the percentage of rear-end collisions there is also assumed to be 13%.
- The time gains attainable using ACC can reduce rear-end collisions by 25%. ACC operates in the Driving, Warning and Assistance phases; phases in which a faster response to safety-relevant situations is possible. More precisely, this means that there will be a clear time gain in the warning phase since the driver could gain up to 0.5 s due to early warning. This number is a scaled value and would be the result of accident causation analysis. It then has to be considered that the system does not detect all problems and is not permanently used. Hence, the warning phase can be scaled down by 0.2 s. In the assistance phase, there is an additional effect which offers a 0.1 s increase in reaction

time. The brake system remains prefilled, which translates to faster brake response. Otherwise, in the driving phase there may be an effect of -0.1 s due to false alarms. The aggregated attainable time saving is 0.2 s. With that, according to figure 5, the collision probability is reduced from 100% to 75%. Therefore, the collision prevention potential for rear-end collisions amounts to 25%.

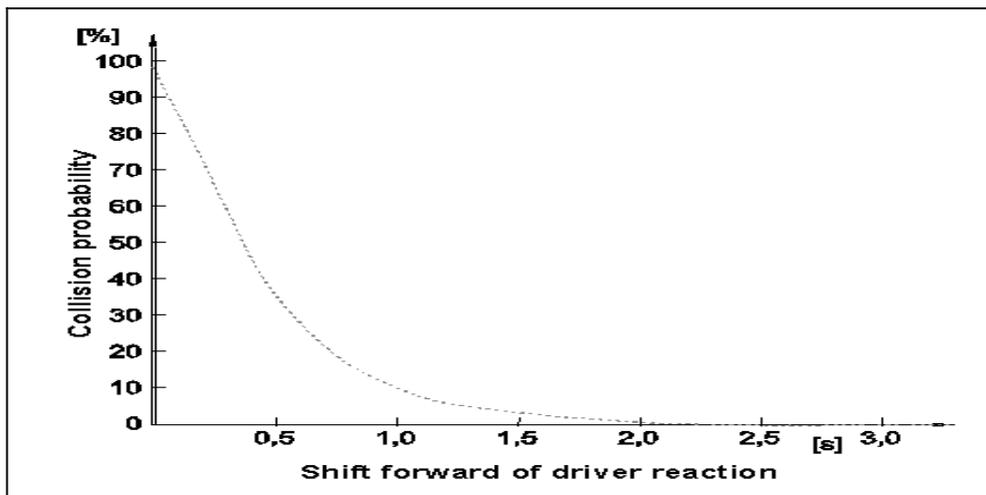


Figure 5: Rear-End Collision Probability (Enke 1979)



Figure 6: Accident Impact Speed and Severity of Injuries

- The time gains also influence the severity of those accidents which cannot be avoided. These time gains can lower vehicle speed and crash impact, leading to a reduction in accident severity. As suggested by figure 6, when speed is reduced by 10 km/h, the probability of severe injuries decreases by 15-20%. It is therefore assumed that 20% of accidents can be shifted down a severity class: 20% of fatalities become severe injuries and 20% of severe injuries become slight injuries. There will be no change from slight injuries to no injuries. The following figure exemplarily shows the correlation of speed and accident severity. Accurate numbers should be derived based on results from accident causation analysis for rear-end collisions.
- Since official databases only count reported accidents, they underestimate the number of accidents involving passenger cars. It is estimated that only about 70% of actual accidents in EU-15 are actually recorded in official databases. That implies that three out of ten accidents are not reported in official databases. This structural underreporting must be taken into account in the benefit assessment process. The underestimation factor therefore accounts for 1.3 (CarTALK 2004, ICF 2003) and is applied for EU-25.

Using this assessment framework, the safety impact of ACC can be calculated. Table 13 shows the number of avoidable accidents in EU-25 by using ACC. In 2010, the number of accidents could be cut by 3,849 (rear-end) collisions. The related casualty figures show 118 fatalities, 802 severe and 3,987 slight injuries. Since market diffusion is higher by 2020, the avoidance potential should also be higher. It accounts for 8,491 avoided accidents. The related casualties aggregate to 240 fatalities, 1,594 severe and 7,929 slight injuries.

Safe Following (ACC) EU-25	Number of Casualties Avoided due to Accident Avoidance	
	2010	2020
Number of Accidents	3,849	8,491
Fatalities	118	240
Severe Injuries	802	1,594
Slight Injuries	3,987	7,929

**Table 13: ACC Impact on Accident Avoidance (author's calculation)**

ACC can also lower the severity of accidents (see table 14). This effect is also important for socio-economic assessment because reducing accident severity also offers reduction potentials for accident costs. In 2010, 95 lives could be saved. In 2020, fatalities could be reduced by 192. As mentioned above, these accidents persist, but at a lower degree of severity. The number of severe injuries thus increases by 95 people (2010) and 192 people (2020). On the other hand, severe injuries can be reduced to slight injuries. This applies for 641 casualties in 2010 and 1,275 casualties in 2020. Therefore, the net reduction of severe injuries aggregates to 546 casualties (= 641-95) in 2010 whereas the reduction in 2020 amounts to 1,083 severe injuries (= 1,275-192). Since there is no severity change for slight injuries, the number of casualties increases by 641(2010) and 1,275 (2020).

Safe Following (ACC) EU-25	Reduced Casualties due to Reduced Accident Severity	
	2010	2020
Number of Accidents	---	---
Fatalities	95	192
Severe Injuries	546	1,083
Slight Injuries	-641	-1,275

**Note:** Minus sign = increase of numbers

**Table 14:** ACC Impact on Accident Severity (author's calculation)

Table 15 gives an overview of the aggregated safety impact of ACC. In total, 213 lives could be saved (2010). In 2020, the number of fatalities could be reduced by 332. The number of severely-injured people could be reduced by 1,348 in 2010 and by 2,677 in 2020. The number of slight injuries could be cut by 3,346 in 2010 and 6,654 in 2020.

Safe Following (ACC) EU-25	Aggregated Safety Impact	
	2010	2020
Number of Accidents	3,849	8,491
Fatalities	213	332
Severe Injuries	1,348	2,677
Slight Injuries	3,346	6,654

**Table 15:** Aggregated ACC Safety Impact (author's calculation)

#### 4.4 Safety Benefits

In order to assess the socio-economic benefits, the safety impact has to be evaluated using cost unit rates which represent different levels of severity. Standard European cost unit rates are applied (1,000,000 € per fatality, 135,000 € per severe injury, 15,000 € per slight injury). Consistent with the values illustrated in table 4, 6,000 € is applied for the property damage in each personal injury accident. The reduction of accident caused congestion is valued with 15,000 € for fatal accidents and 5,000 € for injury accidents (see section 2.4).

The monetary assessment of ACC safety impacts leads to considerable benefits. They account for 490 million € in the year 2010. In 2020, the attainable benefits total 990 million €. Figure 7 shows the distribution of the safety benefits among different components. More than 40% of the total benefits can be attributed to the reduction of fatalities, with a similar contribution being made by the reduction of severe injuries. The remaining 20% of benefits are distributed among the reductions in slight injuries (10%), in property damages (5%) and in congestion (5%).

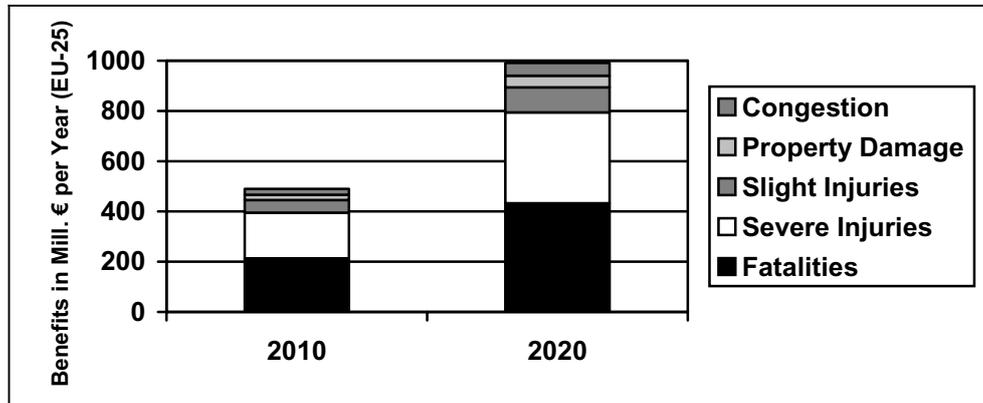


Figure 7: Socio-Economic Benefits of ACC (EU-25; author's calculation)

#### 4.5 Benefit-Cost Ratio for Safe Following (ACC)

In a final step, the socio-economic benefits must be compared with the annual system costs. Table 16 displays the results. The system costs amount to 540 million € in 2010. Taking the socio-economic benefits to be 490 million €, the benefit-cost ratio is 0.9. In 2020, the benefit-cost ratio improves to 1.2. This figure reflects socio-economic benefits of 990 million € and system costs of 840 million €.

Safe Following (ACC) EU-25	Benefit-Cost Assessment in Mill. € per year	
	2010	2020
Benefits	490	990
Costs	540	840
<b>Benefit-Cost Ratio</b>	<b>0.9</b>	<b>1.2</b>

Table 16: Benefit-Cost Ratio for ACC (EU-25; author's calculation)

The benefit-cost ratios show that ACC may be a promising IVSS once market diffusion is more advanced. In the short-time perspective, the ACC unit price of 750 € is too high to initiate a more widespread market diffusion. This also means that while the safety benefits are considerable, they are limited because only 3% of the total car fleet is ACC-equipped. The market perspective by 2020 is more optimistic. Because of the higher volume of ACC systems sold (8% market diffusion equates to more than 20 million equipped cars in EU-25) the system costs have been significantly reduced, to 400 €. This is the main reason for the improvement in the benefit-cost ratio to 1.2, which illustrates that market deployment would be beneficial from society's point of view.

However, fostering market penetration will have a substantial impact on the benefit-cost ratios. For sensitivity reasons, the safety benefit is calculated once more to reflect a market

diffusion rate of 20% in 2020. Using this rate, the attainable benefits amount to 2,300 million €. Due to economies of scale, the system costs therefore aggregate to 1,680 million €. From these numbers, a benefit-cost ratio of 1.4 can be derived. It must be noted that the benefits of 2,300 million € comprise only the safety benefits and the associated reduction in congestion. Other impacts (e.g. capacity effects) are not included in this figure. As argued above, these effects appear once market diffusion exceeds 10-20%. When these effects are included, the benefit-cost ratio will improve substantially.

The results of other research projects show that the price of the system will have to fall considerably to attain approximate market diffusion rates of 50% across Europe (DIATS 1999: 56f.). Furthermore, unstructured and multi-brand-based production policies may be harmful to ACC success and deter rapid market diffusion (ADVISORS 2003: 82). ACC does, however, possess considerable potential for impact as an enabling function for future ACC enlargements.

## 5. Lane Departure Warning and Lane Change Assistance

### 5.1 Description of the system

Lane Departure Warning (LDW) systems assist drivers in keeping to their lanes by warning drivers when their cars are in danger of leaving their lane unintentionally (mainly due to lack of driver attention). Current systems use either an audible beep or a “rumble strips” noise, which mimics the sound made when a tyre runs over a lane divider. Lane Change Assistance (LCA) assists drivers intending to change lanes. The LCA monitors the adjacent lanes and warns the driver if another vehicle is likely to come within colliding distance during the lane change. This occurs, for example, if the other vehicle is located in the LCA-equipped vehicle’s blind spot. In the benefit-cost analysis for this case study, these two systems have been analysed as a single combined system.

In order to carry out a benefit-cost analysis of the safety impacts of LDW and LCA, several different pieces of information are needed:

- The costs of LDW and LCA and their equipment rates at a particular point in time (here: 2010 and 2020),
- The number of relevant accidents (= accidents which could be avoided using LDW and LCA),
- The level of efficiency of LDW and LCA in avoiding these relevant accidents,
- The costs of accidents to society.

## 5.2 Market Penetration and System Costs

The costs and market diffusion rates of LDW and LCA were predicted using market analyses from various different research institutes. Expert interviews were also carried out in order to verify the data from the different market studies. It is assumed that in the year 2010 just 0.6 % of all vehicles will be equipped with LDW and LCA. By 2020, the diffusion rate will have increased to 7 %. The costs are predicted as € 600 per unit in 2010 (LDW and LCA each cost € 300) and € 400 per unit in 2020. The service life is fixed at 12 years, which is the average lifespan of passenger vehicles in the European Union. Using these figures, the annual costs of equipping vehicles with LDW and LCA amount to in total 86 million € in 2010 and 735 million € in 2020.

These vehicle equipment rates do not express the percentage of vehicle kilometres driven by vehicles equipped with LDW and LCA. This is due to the fact that drivers who drive a lot (and who thus have a relatively high accident exposure risk) will easier spend money on IVSS. Thus it is assumed (based on figure 4, section 4.2) that, for example, 3 % market diffusion leads to approx. 6 % of vehicle kilometres being driven with an IVSS-equipped vehicle.

## 5.3 Safety Impact

The next step involves identifying the percentage of relevant accidents, i.e. the share of accidents which could be avoided due to LDW and LCA. It is assumed that LDW can avoid or reduce the severity of the following two different types of accidents (McKeever 1998):

- Accidents in which two vehicles collide frontally (head-on collision). 2.7 % of all accidents are assumed to be of this type (McKeever 1998).
- Accidents in which a vehicle leaves the road without colliding with another vehicle (“left roadway” accidents). This accident type is more frequent. Referring to all road types (rural, urban and highways), it is assumed that 19.5 % of all accidents belong to this category (McKeever 1998).

Since LCA only supports the lane-change process and does not warn of unintended lane departure, it cannot be assumed that it contributes to the avoidance or mitigation of the types of accidents stated above. However, a further accident type can possibly be avoided or lessened by both the LDW and LCA systems:

- Accidents in which two or more vehicles collide laterally (side-collision accidents) can possibly be avoided by LDW and LCA, depending on the cause of the accident. If the side collision is caused by unintended lane change, LDW can help avoid the crash. If it is due to an intended lane change, LCA could warn the driver in time. In this analysis, it is conservatively assumed that only side-collision accidents between vehicles travelling in the same direction could be avoided. This holds true for LCA, whereas LDW could possibly also help to avoid accidents in cases where the cars were travelling in opposite

directions. It is estimated that 2.5 % of all accidents is made up of side-collision accidents in which the vehicles are travelling in the same direction (McKeever 1998).

These percentage values appear reasonable compared with accident statistics from Germany and other studies analysing the accident avoidance capabilities of LCA and LDW (Statistisches Bundesamt 2003, NHTSA 1996).

The next step estimates the number of relevant accidents which actually will be avoided or mitigated due to the system functions (Efficiency of LCA and LDW). This estimation differentiates between avoided accidents/fatalities and reduced casualty figures due to mitigation of accident severity. The mitigation is taken into account by shifting the number of casualties in each severity class down a severity class, i.e. from “Fatality” to “Severe injury”, and “Severe injury” to “Slight injury”. There is no change from “Slight injury” to “No injury”, which results in negative values for slight injuries in the table showing the number of accidents and casualties avoided due to reduced accident severity (see below).

It has been shown in various studies that the official accident statistics do not include all accidents which actually occurred. There is a considerable rate of unreported accidents, which varies according to accident severity and member state. In order to assess all benefits of IVSS, these accidents must also be accounted for. In line with enquiries conducted to quantify the amount of unreported accidents (see, for example, ICF Consulting Ltd 2003), it is estimated that accident figures increase by 30 % if unreported accidents are included.

Based on a functional relationship between faster driver reaction and collision probability (Enke 1979), the following assumptions were made about the percentage of accidents avoided and/or mitigated due to LDW and LCA:

- Head-on collisions: It is assumed that LDW warning enables a driver to react, on average, 0.5 seconds earlier than he or she would without the system. This effects a collision reduction of 25 % for all relevant accidents. Furthermore, in 25 % of the accidents, a reduction in accident severity can be assumed.
- “Left roadway” accidents: Time gains of 0.5 seconds can also be assumed for this type of accident using an LDW system. This translates into 25 % accident avoidance and 15 % accident severity reduction.
- Side-collision accidents: Here, both analysed IVSS can contribute to accident avoidance. It is assumed that the aggregate time gain is composed of 0.5 s for the warning phase (LDW and LCA affect different accident causes and therefore the time gains are not combined) and 0.2 s for the assistance phase (LCA with haptic feedback). The cumulated time gain is 0.7 s. This leads us to expect a 60 % reduction in the number of accidents and a 10 % reduction in accident severity.

The accident avoidance potential is calculated based on the information provided above about the number of accidents in the years 2010 and 2020, the percentage values of relevant accidents and system efficiency rates for accident avoidance and mitigation. The first table shows the number of accidents directly avoided. Due to the rather low diffusion rate by 2010, relatively few accidents could be avoided in that year. It is estimated, that 1,442 accidents with 1,848 casualties (51 fatalities, 293 severely-injured people and 1,504 slightly-injured people) could be directly avoided with LDW and LCA in 2010. For 2020, this figure rises to 13,889 accidents with 16,047 casualties.

LDW and LCA EU-25	Number of Casualties Avoided due to Accident Avoidance	
	2010	2020
Number of Accidents	1,442	13,889
Fatalities	51	451
Severe Injuries	293	2,548
Slight Injuries	1,504	13,048

**Table 17: Number of Accidents and Casualties Avoided due to Accident Avoidance (author's calculations)**

Casualties are also avoided due to accident mitigation. This means that, while the accident cannot be avoided, the level of injuries it causes is shifted down a severity class. As has been mentioned before, since there are no shifts from "slight injuries" to "no injuries", these values are negative (see table below). This means that accident mitigation results in a greater number of slightly-injured people compared with the reference situation. If the number of directly-avoided slight injuries is also taken into account (1,504 for 2010, see table above), there is still a considerable reduction in slight injuries due to the application of LDW and LCA ( $1,504 - 160 = 1,344$  for 2010).

LDW and LCA EU-25	Reduced Casualties due to Lower Accident Severity	
	2010	2020
Number of Accidents	---	---
Fatalities	28	246
Severe Injuries	133	1,145
Slight Injuries	- 160	- 1,391

**Note:** Minus sign = increase of numbers

**Table 18: Number of Accidents and Casualties Avoided due to Reduced Accident Severity (author's calculations)**

Table 19 gives an overview of the aggregated safety impact of LDW and LCA. In total, 79 lives could be saved (2010). In 2020, the number of fatalities could be reduced by 697. The number of severely-injured people could be reduced by 426 in 2010 and by 3,693 in 2020. The number of slight injuries could be cut by 1,344 in 2010 and 11,657 in 2020.

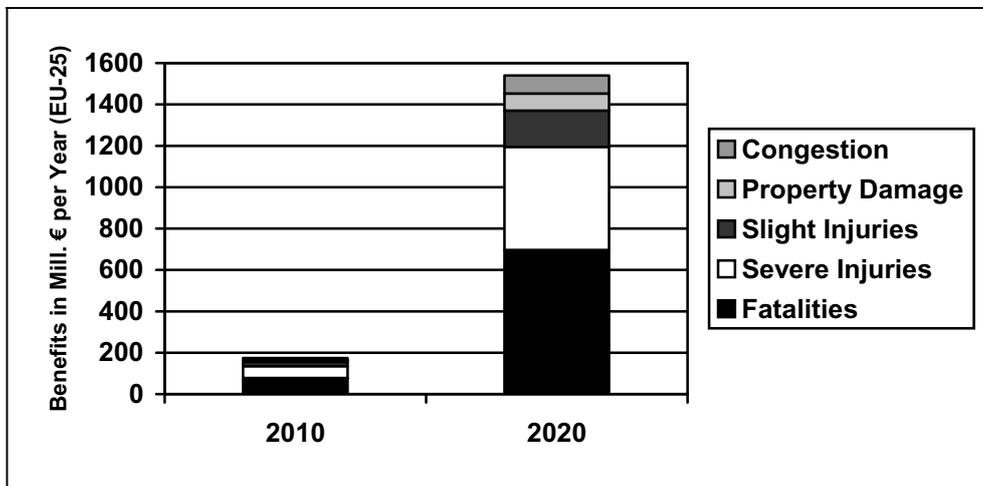
LDW and LCA EU-25	Aggregated Safety Impact	
	2010	2020
Number of Accidents	1,442	13,889
Fatalities	79	697
Severe Injuries	426	3,693
Slight Injuries	1,344	11,657

**Table 19: Aggregated LDW and LCA Safety Impact (author’s calculation)**

5.4 Safety Benefits

In order to assess the benefits, the physical effects caused by the use of LDW and LCA in the years 2010 and 2020 must be assigned monetary values. Similar to the other case studies, standard European cost unit rates are applied. With that, the benefits of LDW and LCA amount to 173 million € for the year 2010. In 2020, the benefits accrue to 1,529 million €.

The distribution of benefits according to their physical causes is shown in figure 8. It can be seen that the large majority of cost savings can be ascribed to personal damage costs (approx. 90 % of total costs). Fatalities account for nearly half of the total accident costs. Congestion and property damage costs each account for approx. 5 % of all costs. Costs due to slight injuries constitute approx. 10 % of all costs.



**Figure 8: Distribution of Benefits According to Physical Causes in 2010 and 2020 (author’s calculation)**

### 5.5 Benefit-Cost Ratio for LDW and LCA

Using the information stated above, the benefits and costs for the years 2010 and 2020 can be compared. The results are displayed in table 20. As can be seen, the benefits resulting from the employment of LDW and LCA are roughly twice as high as the costs. Since the market diffusion in 2010 is only 0.6 %, the absolute values are rather low compared to the costs and benefits for 2020 (7 % equipment rate). The benefit-cost ratio increases slightly over time, mainly due to sinking unit costs for the systems.

<b>LDW and LCA EU-25</b>	<b>Benefit-Cost Assessment in Mill. € per year</b>	
	<b>2010</b>	<b>2020</b>
Benefits	173	1,529
Costs	86	735
<b>Benefit-Cost Ratio</b>	<b>2.0</b>	<b>2.1</b>

**Table 20: Benefit-Cost Ratio for LDW and LCA (EU-25; author's calculation)**

This case study shows that the introduction of LDW and LCA could be beneficial to the society. Support from public authorities to promote the development and use of LDW and LCA can be justified on the grounds of economic considerations.

## 6. Conclusion

The overall results of the empirical case studies indicate the socio-economic favourability to deploy IVSS. From the methodological point of view, the exemplary calculations have demonstrated that the proposed assessment framework is workable with different IVSS (workability proof). According to the system specification the calculation is based on different levels of detail regarding system parameters, impact channels, input data scenarios (pessimistic/optimistic scenario) and market penetration, e.g. assumption of full penetration (sensitivity proof). Obviously, the socio-economic impact assessment has to cope with data limitations which also influence the calculation results. In this context, the proposed SEiSS methodology provides a framework for impact assessment which can be filled according to the level of available information. With that, the data input for the exemplary calculations should be reviewed and refined in a further step in order to carry out more detailed impact calculations.

## Abstract

Intelligent Vehicle Safety Systems (IVSS) are expected to make road traffic considerably safer, cleaner and more efficient. Therefore, the European Commission is engaged to support the market deployment and penetration of these systems. A base requirement for such an enhancement strategy is the socio-economic impact assessment of IVSS. The selected case studies for applying cost-benefit appraisals are eCall, Safe Following (ACC) and a combined Lane Departure Warning (LDW) and Lane Change Assistance (LCA). The applied appraisal method is cost-benefit analysis. The assessment is carried out on EU-25 basis for the target years 2010 and 2020. The benefits comprise savings of accident costs and accident caused congestion costs. The results show all over benefit-cost results higher than 1, i.e. the benefits exceed the costs. With that, the profitability of the IVSS introduction is proven on society level.

## Literature

ADVISORS (2003): “Action for advanced Driver assistance and Vehicle control systems Implementation, Standardisation, Optimum use of Road network and Safety”; Final Publishable Report; April 30, 2003; [http:// www.advisors.iao.fraunhofer.de/](http://www.advisors.iao.fraunhofer.de/)

CARE (Community Accident Report Database) (2004): [http://europa.eu.int/comm/transport/care/studies/index\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/transport/care/studies/index_en.htm)

CarTALK (2004): “Socio-Economic Assessment, Deliverable 12”.

DIATS (1999): “Assessment of the safety issues relevant to the deployment of ATT test scenarios. Deliverable 15”, October 1998.

EC (European Commission) (2003): “Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 1999/62/EC on the Charging of Heavy Goods Vehicles for the Use of Certain Infrastructure”, Bruxelles.

eCall MoU (2004): “eSafety Forum, eCall Driving Group, Memorandum of Understanding for Realisation of Interoperable In-Vehicle eCall”.

E-MERGE (2004): “Cap Gemini Ernst & Young, E-MERGE Compiled Evaluation Results, Deliverable 6.3.”.

Enke, M. (1979): „Collision probability related to the shift forward of driver reaction”, in: National Highway Traffic Safety Administration (ed.): “7th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, June 5-8, 1979”, Washington D.C., pp. 789-802.

eSafety (2004): “eSafety Forum, Summary Report, The eSafety High-Level Meeting with Public Authorities, Brussels, 27 September 2004, Annex 1: eCall”

- ICF Consulting Ltd. (2003): „Cost-Benefit Analysis of Road Safety Improvements. Final Report”, June 12, 2003, [http://europa.eu.int/comm/transport/road/library/icf\\_final\\_report.pdf](http://europa.eu.int/comm/transport/road/library/icf_final_report.pdf)
- IRTAD (International Road Traffic and Accident Database) (2004): <http://www.bast.de/htdocs/fachthemen/irtad/english/irtadlan.htm>
- McKeever, B. B. (1998): „Working Paper: Estimating the Potential Safety Benefits of Intelligent Transport Systems”, November 1998, <http://plan2op.fhwa.dot.gov/pdfs/Pdf2/Edl08883.pdf>.
- NHTSA (1996): “Preliminary Assessment of Crash Avoidance Systems Benefits”, October 1996.
- ProgTrans AG (2004): „European Transport Report 2004“.
- Statistisches Bundesamt (2003): „Verkehrsunfälle 2002“, Wiesbaden.
- SWOV (Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid) (2003): “Van Kampen, B., Case Study: Rear end or chain accidents”, October 2003.
- U.S. Department of Transportation (2002): “The Economic Costs of Motor Vehicle Crashes 2000”, NHTSA Technical Report, Washington DC.