

# Kosten und Finanzierung: Optimale Investitionsstrategien in Infrastrukturqualität

VON ERIC NITZSCHE, DRESDEN

## 1. Einleitung

527.000 km des deutschen 660.000 km langen Straßennetzes befinden sich in kommunaler Trägerschaft (Knoll, 2007). Was sollte dieser immer stärker beanspruchte kommunale Infrastrukturbestand der Gesellschaft wert sein? Der Ersatzbedarf kommunaler deutsche Straßen beträgt 70,6 Mrd. Euro (Reidenbach et al., 2008). Ungenügende Investitionen in die Erhaltung des Straßennetzes können dessen Funktion erheblich beeinträchtigen. Direkte Folgen wie Substanzverluste und damit einhergehende Kapazitätsüberlastungen und Staus beeinflussen neben verkehrlichen auch ökonomische und räumliche Entscheidungen von Unternehmen und Haushalten gleichermaßen.

Für die Instandhaltung und den Betrieb der Straßen in den Gemeinden sind die öffentlichen kommunalen Haushalte verantwortlich. Laut der Kommission „Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung“ ist bei der Finanzierung der Gemeindestraßen weniger die Straßenunterhaltung, sondern vordergründig die Erneuerung der Straßeninfrastruktur problematisch, wodurch notwendige Erneuerungen unterblieben (Daehre, 2012). Durch die anhaltende Unterfinanzierung (DStGB, 2014) verschlechtern sich der Zustand und damit die Leistungsfähigkeit der Straßeninfrastruktur. Als mögliche Maßnahmen zur Behebung des Defizits werden durch die Kommission „Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung“ u.a. die Erhöhung der Mineralölsteuer und die Einführung einer Infrastrukturabgabe genannt und deren mögliche Vor- und Nachteile qualitativ beschrieben (Daehre, 2012).

Im folgenden Artikel werden die verkehrlichen, ökonomischen und räumlichen Auswirkungen der beiden genannten Maßnahmen sowie der Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer und einer Erhöhung der Lohnsteuer zur Finanzierung der Straßenerhaltung unter Wohlfahrtsaspekten quantitativ untersucht und miteinander verglichen. Zur Ermittlung der gesellschaftlichen Kosten durch Infrastrukturschäden und der Auswirkungen von Infrastrukturinvestiti-

---

### *Anschrift des Verfassers:*

Dipl.-Verk. Wirtsch. Eric Nitzsche  
Technische Universität Dresden  
Institut für Wirtschaft & Verkehr  
Würzburger Str. 35  
01187 Dresden  
e-mail: eric.nitzsche@tu-dresden.de

onen wird ein räumliches Gleichgewichts- und Transportmodell verwendet. Aufbauend auf einem, für eine durchschnittliche deutsche Metropolregion kalibrierten, Benchmark Modell (Nitzsche und Tscharktschiew, 2013) werden zunächst die gesellschaftlichen Kosten, welche durch die auslastungs- und belastungsabhängigen Infrastrukturschäden entstehen, berechnet. Anschließend wird untersucht, wie sich die Erneuerung der Infrastruktur auf die ökonomischen, räumlichen und verkehrlichen Entscheidungen der Haushalte und Unternehmen auswirkt. Die Investitionssumme, die durch eine zusätzliche Lohn- oder Energie- oder CO<sub>2</sub>-Steuer oder eine Maut aufgebracht werden muss, orientiert sich an den zuvor entstanden gesellschaftlichen Kosten durch Infrastrukturschäden.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine erweiterte Energiesteuer für den Pkw- und Lkw-Verkehr sowie eine nutzungsabhängige Maut für diesen unter Wohlfahrtsaspekten am besten geeignet sind, Infrastrukturschäden vollständig zu beheben. Im Vergleich zu einer höheren Lohnsteuer ist auch eine zusätzliche CO<sub>2</sub>-Steuer für den Pkw-, Lkw- und öffentlichen Personenverkehr geeignet, die Schäden vollständig zu beheben, jedoch entsteht durch beide Maßnahmen weniger Wohlfahrtszuwachs als durch Energiesteuer und Maut.

Der Artikel ist wie folgt gegliedert: Zunächst wird in Abschnitt 2 das räumliche Gleichgewichts- und Transportmodell beschrieben. Die Modellierung der Infrastrukturschäden und deren Sanierung beschreibt Abschnitt 3. Abschnitt 4 präsentiert die Ergebnisse und Abschnitt 5 dient der Zusammenfassung des Artikels.

## 2. Modellansatz

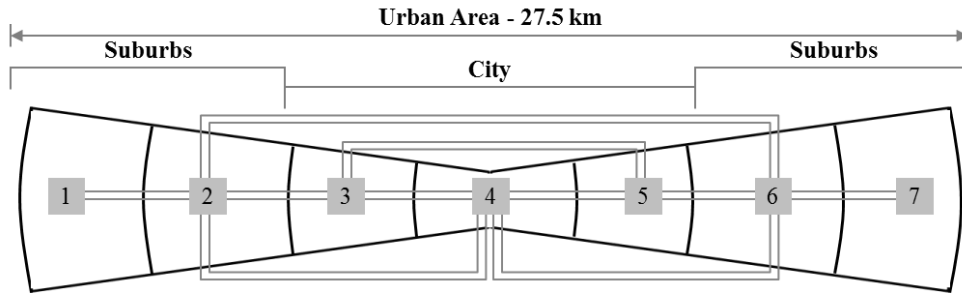
Für die Bestimmung der Wirkung der verschiedenen Infrastrukturfinanzierungsinstrumente wird ein räumliches Gleichgewichtsmodell auf der Basis des von Anas und Liu (2007) entwickelten RELU-TRAN<sup>2</sup> Modells verwendet. Dieses ermöglicht neben der Betrachtung der Interaktionen zwischen verschiedenen Märkten (Land-, Arbeits- und Gütermarkt) und zwischen Haushalten und Unternehmen die ausführliche Betrachtung der schaden- und maßnahmenabhängigen Entwicklungen im Verkehrssektor. Da in besonderem Maße der Lastwagenverkehr zur Schädigung der Straßeninfrastruktur beiträgt, erweiterten Nitzsche und Tscharktschiew (2013) das RELU-TRAN Modell um den Wirtschaftsverkehr.

### 2.1 Struktur der stilisierten Metropolregion

Den Untersuchungen liegt eine stilisierte Metropolregion mit einer Ausdehnung von 27,5 km, bestehend aus  $I = 7$  Zonen, zugrunde (Abbildung 1). Zone  $i = 4$  ist das Stadtzentrum, die Zonen 3-5 bilden die zentrumsumgebenden Stadtteile, die Zonen 2 und 6 repräsentieren die Stadtrandgebiete und die Zonen 1 und 7 die Vororte der Metropolregion. Jede der Zonen  $i (i \in I)$  umfasst eine homogene Fläche  $A_i$ , welche zum Wohnen und als Produktionsmittel genutzt werden kann, sowie eine Straßenfläche  $B_i$ .

---

<sup>2</sup> Regional Economy, Land Use, and TRANsportation Modell.

**Abbildung 1: stilisierte Metropolregion**

Alle Zonen sind mit einem Transportnetzwerk bestehend aus  $L$  Straßen, deren Kapazität von der Straßenfläche  $B_i$ , der jeweiligen Straßenkategorie und der Infrastrukturqualität abhängen (Tscharaktschiew und Hirte, 2010), miteinander verbunden. Neben städtischen Straßen, welche direkt benachbarte Zonen miteinander verbinden, gibt es auch verschiedene Umgehungs- bzw. Ringstraßen, welche die Umfahrung des Stadtzentrums und einzelner Stadtteilzentren ermöglichen. Das abgebildete Transportnetz kann vollständig vom Pkw- und Lkw-Verkehr genutzt werden. Für den Fußgänger- und öffentlichen Personennahverkehr stehen hingegen nur die direkt durch die Stadt verlaufenden Wege zur Verfügung. Weitere Details über die Struktur der Metropolregion werden in Nitzsche und Tscharaktschiew (2013) beschrieben.

## 2.2 Haushalte

Die  $N = 1,5$  Mio. Haushalte (HH) sehen sich einem dreistufigen Entscheidungsprozess gegenüber. Für die ersten beiden Stufen nehmen die HH Reisekosten und -zeiten als gegeben an. In der ersten Stufe entscheiden die HH für alle möglichen Wohnlagen  $i$  und Arbeitsstätten  $j$  über die Güternachfrage  $Z_{ijk}$  aus Zone  $k$  ( $k \in I$ ), die Wohnungsgröße  $q_{ij}$  und die Zeit für Freizeit  $\ell_{ij}$ . Gleichung (1) zeigt die Nutzenfunktion eines typischen Haushalts mit Wohnort  $i$  und Arbeitsort  $j$ .

$$U_{ij} = \alpha \ln \left( \sum_{k=1}^I (Z_{ijk})^\eta \right)^{\frac{1}{\eta}} + \beta \ln q_{ij} + \gamma \ln \ell_{ij} + \varepsilon_{ij}, \forall i, j \in I \quad (1)$$

Es gilt:  $0 < \alpha, \beta, \gamma < 1, \alpha + \beta + \gamma = 1$ . Die idiosynkratische Konstante  $\varepsilon_{ij}$ , welche den zufälligen Teil der Nutzenfunktion abbildet, variiert zwischen den HH für jede Wohnort-Arbeitsort-Kombination. Die konstante Substitutionselastizität  $1/(1 - \eta)$ ,  $\eta < 1$  (Dixit und Stiglitz, 1977) beschreibt die Vorliebe für Vielfalt im Konsum der räumlich differenzierten Konsumgüter.

Die HH werden bei der Entscheidung über die Güternachfragen durch ein monetäres (Gleichung 2) und zeitliches (Gleichung 3) Budget beschränkt.

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^I [(1 + p_k^2) + \varsigma C_{ik}] Z_{ijk} + r_i q_{ij} + D_{ij} C_{ij} \\ & = (1 - \tau^{inc} - w) w_j D_{ij} \mathcal{T} + (1 - \tau^{inc}) RD - \tau^{ls}, \forall i, j \in I \end{aligned} \quad (2)$$

$$D_{ij} \mathcal{T} + \ell_{ij} + \sum_{k=1}^I \varsigma Z_{ijk} T_{ik} + D_{ij} T_{ij} = E, \forall i, j \in I \quad (3)$$

Die linke Seite von Gleichung 2 zeigt die Ausgaben eines HH.  $p_k^2$  ist der Preis des Konsumguts in Zone  $k$ ,  $\varsigma$  ist die Anzahl der Fahrten je konsumierter Einheit,  $r_i$  ist die Miete je qm in Zone  $i$ .  $D_{ij}$  beschreibt die Arbeitstage je Jahr und  $C_{ik}$  bzw.  $C_{ij}$  die erwarteten Reisekosten für die Hin- und Rückfahrt (Tour) zwischen Wohnort  $i$  und Einkaufs- bzw. Arbeitsort  $k$  bzw.  $j$ .  $\tau^z$  ist der Mehrwertsteuersatz. Die rechte Seite von Gleichung 2 zeigt das HH-Einkommen, bestehend aus Arbeitseinkommen (Anzahl Arbeitstage  $D_{ij}$  multipliziert mit der Arbeitszeit je Tag  $\mathcal{T}$  und dem Stundenlohn  $w_j$ ) und Mieteinkommen  $RD$ .  $\tau^{inc}$  beschreibt den Einkommenssteuersatz,  $\tau^{ls}$  entspricht einer Pauschalsteuer zum Ausgleich des öffentlichen Budgets und der Steuersatz  $w$  dient ggf. als Finanzierungsinstrument zur Behebung von Straßenschäden. Gleichung 3 zeigt die Aufteilung der jährlich zur Verfügung stehenden Zeit  $E$  in Arbeitszeit, Freizeit und Reisezeit für Einkaufs- bzw. Pendelfahrten, wobei  $T_{ik}$  bzw.  $T_{ij}$  die erwartete Reisezeit je Tour angibt.

Basierend auf den nachgefragten Güterbündeln für jede  $i$ - $j$ -Kombination wählen die HH in der zweiten Stufe ihren nutzenmaximierenden Wohn- und Arbeitsort. Die Wahlwahrscheinlichkeit dieser HH-Entscheidung für eine bestimmtes  $i$ - $j$ -Paar wird mit einem multinomialen Logit Modell abgebildet (Nitzsche und Tscharkschiew, 2013).

Für die Entscheidungen der dritten Stufe nehmen die HH die Konsumententscheidungen und die Wahl des Wohnort-Arbeitsort-Paares als gegeben an und treffen auf dieser Basis Entscheidungen über die Verkehrsmittelwahl  $m \in \{\text{fuß, öpnv, auto}\}$  und, im Fall der Autonutzung, über die Routenwahl. Die daraus resultierenden Reisekosten und -zeiten bilden wiederum die Grundlage für die ersten beiden Entscheidungsstufen. Die monetären Reisekosten je Weg zwischen Zone  $i$  und  $\zeta \in [j, k]$  mit Verkehrsmittel  $m$  berechnen sich wie folgt:

$$c_{i\zeta}^m = (c^{1;m} d_{i\zeta}^m + c^{2;3} f_{i\zeta}^3 + c^{3;m})(1 + \tau^m) + \tau d_{i\zeta}^3 + \varrho e m_{i\zeta}^m, \forall i, \zeta \in I \quad (4)$$

Hierbei entspricht  $c^{1;m}$  verkehrsmittelspezifischen Kosten je km mit Ausnahme von Kraftstoffkosten. Die autospezifischen Kraftstoffkosten je Liter werden durch  $c^{2;3} = (p^g + \tau^g + \varrho)$  beschrieben<sup>3</sup>.  $c^{3;m}$  bezeichnet weitere verkehrsmittelspezifische und distanzunabhängige Fixkosten. Der verkehrsmittelspezifische Mehrwertsteuersatz wird durch  $\tau^m$  beschrieben, der Netto-Kraftstoffpreis durch  $p^g$  und der entsprechende Energiesteuersatz mit  $\tau^g$ . Für die Verkehrsmittel  $m = 1$  (fuß) und  $m = 2$  (öpnv) ist die Distanz zwischen

<sup>3</sup> Im Simulationsmodell ist die zusätzliche CO<sub>2</sub>-Steuer ebenfalls Bestandteil des Kraftstoffpreises, wird jedoch, wie in Formel 4 dargestellt, nicht zusätzlich mehrwertbesteuert.

zwei Zonen  $d_{i\zeta}^m$  exogen gegeben. Für  $m = 3$  (auto) wird die erwartete Distanz, der erwartete Kraftstoffverbrauch  $f_{i\zeta}^3$  und CO<sub>2</sub>-Ausstoß  $em_{i\zeta}^3$  für eine Fahrt zwischen zwei Zonen  $i - \zeta$  endogen bestimmt und hängt von den Routenwahl-Wahrscheinlichkeiten ab. Neben dem Kfz-Verkehr emittiert auch der ÖPNV-Verkehr CO<sub>2</sub>  $em_{i\zeta}^2$ . Die Parameter  $\mathfrak{g}$ ,  $\mathfrak{t}$  und  $\mathfrak{e}$  beschreiben die weiteren möglichen Finanzierungsinstrumente zur Behebung von Straßenschäden.  $\mathfrak{g}$  entspricht einer erweiterten Energiesteuer und  $\mathfrak{e}$  einer CO<sub>2</sub>-Steuer.  $\mathfrak{t}$  ist eine distanzabhängige Maut im Straßenverkehr.

Die Reisezeiten zwischen zwei Zonen  $i - \zeta$   $t_{i\zeta}^m$  sind für  $m = 1$  und  $m = 2$  exogen, während sie für  $m = 3$  endogen bestimmt werden und ebenfalls von den Routenwahl-Wahrscheinlichkeiten abhängen. Die erwarteten Reisekosten  $C_{i\zeta}$  und -zeiten  $T_{i\zeta}$  einer Tour, welche in den ersten beiden Entscheidungsstufen eines HH einfließen, ergeben sich aus der Summe der Reisekosten und -zeiten je Weg, gewichtet mit den entsprechenden Verkehrsmittelwahl-Wahrscheinlichkeiten zwischen zwei Zonen  $i - \zeta$ . Nitzsche und Tscharschiew (2013) bieten in ihrem Artikel eine ausführliche Herleitung zur Berechnung der Routen- und Verkehrsmittelwahl-Wahrscheinlichkeiten, der Reisezeiten je Weg, der erwarteten Reisekosten und Reisezeiten je Tour sowie des stauabhängigen Kraftstoffverbrauchs und CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.

### 2.3 Produzenten

In dem Simulationsmodell gibt es zunächst zwei verschiedene Industrien. Eine Vorproduktindustrie ( $n = 1$ ) und eine Konsumgüterindustrie ( $n = 2$ ). Für die Produktion des Vorproduktes  $X_j^1, \forall j \in I$  werden die Faktoren Arbeit und Land durch eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion miteinander kombiniert. Zur Produktion von Konsumgütern  $X_j^2, \forall j \in I$  werden die Produktionsfaktoren Arbeit, Land und räumlich differenzierte Vorprodukte durch eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion miteinander kombiniert. Der Produktionsfaktor Vorprodukt ist in eine C.E.S.-Subproduktionsfunktion eingebettet und wird gleichermaßen aus allen Zonen bezogen. Beide Güter können in jeder Zone  $j$  produziert werden. Sie unterscheiden sich jeweils in ihrer räumlich differenzierten Lage und werden zum Mill-Preis angeboten. In Analogie zu den HH, welche, um ein Konsumgut zu erwerben, von ihrem Wohn- zum Produktionsort des Konsumgutes fahren müssen, müssen die Unternehmen der Konsumgutindustrie die benötigten Vorprodukte vom Produktionsstandort des jeweiligen Vorprodukt-Unternehmens abholen, wodurch Wirtschaftsverkehr entsteht. Nitzsche und Tscharschiew (2013) zeigen im Detail die Herleitung der verschiedenen Produktions- und Kostenfunktionen, der kostenminimalen Faktornachfragen sowie die Integration des Wirtschaftsverkehrs in das Verkehrsmodell.

### 2.4 Weitere ökonomische Akteure

Neben den HH und Produzenten gibt es in dem Simulationsmodell einen öffentlichen Sektor, welcher Einnahmen aus der Erhebung von Mehrwert-, Einkommens- und Energiesteuer

generiert, einen Transportsektor, welchem jegliche monetären Reise-/Transportkosten (mit Ausnahme von Steuern) zufließen, und nichtstädtische Landbesitzer, welchen ein Teil der städtischen Landfläche und damit Mieteinnahmen gehören. Die genannten Akteure erwerben, unter Beachtung ihres verfügbaren Budgets, die in der Metropolregion hergestellten Konsumgüter (Nitzsche und Tscharaktschiew, 2013).

## 2.5 Benchmark

Im allgemeinen räumlichen Gleichgewicht räumen die endogenen Mieten, Löhne, Vorprodukt- und Konsumgutpreise die räumlich differenzierten Märkte für Land, Arbeit, Vorprodukte und Konsumgüter (Nitzsche und Tscharaktschiew, 2013).

Als Ausgangspunkt für die folgenden Untersuchungen wurde, basierend auf dem stilisierten Stadtmodell, das räumliche Gleichgewichtsmodell für eine durchschnittliche deutsche Metropolregion kalibriert. Tabelle 1 zeigt in der zweiten Spalte die berechneten Modell- und in der dritten Spalte die entsprechenden statistisch ermittelten Werte deutscher Statistikämter.<sup>4</sup> Zusätzlich wurde das Modell auch an empirisch evidenten Werten, siehe Tabelle 2, ausgerichtet. Die genaue und ausführliche Kalibrierung kann in Nitzsche und Tscharaktschiew (2013) nachgelesen werden.

Tabelle 2 zeigt vier verschiedene verkehrsspezifische Elastizitäten, welche mit dem räumlichen Gleichgewichtsmodell berechnet und in die empirische Literatur eingeordnet wurden. Erwartungsgemäß und in Übereinstimmung mit der Empirie sind die Eigenpreiselastizitäten der Verkehrsmodi Auto und ÖPNV negativ, wodurch die Nachfrage nach Auto- bzw. ÖPNV-Fahrten mit steigenden Benzin- bzw. Fahrpreisen sinkt. Wie die positive Kreuzpreiselastizität in Tabelle 2 zeigt steigt die Nachfrage nach ÖPNV-Fahrten wenn die Kosten von Autofahrten ansteigen. Eine weitere, für die Einordnung der Ergebnisse wichtige, Kenngröße ist die Eigenpreiselastizität der Benzinnachfrage. Deren negativer Wert zeigt, dass die Nutzungseffizienz des Kraftstoffs mit steigendem Kraftstoffpreis, z.B. aufgrund einer höheren Energiesteuer, steigt. Hierdurch sinkt ceteris paribus der Benzinverbrauch und damit einhergehend die Schadstoffemissionen je Strecke.

---

<sup>4</sup> Die ökonomischen Charakteristika beziehen sich auf das Jahr 2009, ausgenommen den Daten welche für dieses Jahr nicht verfügbar sind.

**Tabelle 1: Benchmark vs. Statistik**

Durchschnitt über alle Zonen und Haushalte	Modell	Statistik	Quelle
Bruttolohn [€/h]	20,36	20,30 (2010)	1
Arbeitstage [d/a]	217	213-222 (2010)	2
Nettoeinkommen [€/a]	34184	34476 (2009)	1
Verhältnis Einkaufs- / Pendelfahrten	1,51	1,50 (2008)	3
Unterwegszeit [min]	87	79-88 (2008)	3
Tagesstrecke [km]	37	39 (2008)	3
Anteil Verkehrsausgaben am verfügbaren Einkommen	0,11	0,11 (2009)	1
Anteil Wohnausgaben am verfügbaren Einkommen	0,22	0,23 (2010)	4
Geschwindigkeit Auto [km/h]	33	30 (2002)	5
Benzinverbrauch [l/100 km]	7,9	8,0 (2008)	6
Modal Split zu Fuß/ÖPNV/Auto [%]	30/18/52	30/18/52 (2008)	3
Anteil Wirtschafts-/Kfz-Verkehr	0,09	0,08 (2010)	7
BIP pro Kopf [1000 €]	44,6	Köln: 42,0 (2009) Bonn: 43,5 Nürnberg: 44,4 Münster: 44,4 Hamburg: 47,5	8
Anteil Arbeitseinkommen am BIP	0,79	0,76	1
Arbeitsplatzausstattung Suburb/City Arbeitsplätze in $i$ Erwerbstätige in $i$	0,91/1,27	0,87/1,54 (Hannover) 0,79/1,33 (Hamburg) 0,86/1,39 (München) 0,89/1,56 (Stuttgart)	9
Verhältnis Zeitwert <sup>5</sup> / Nettolohn	0,87	0,78	10/11
Tägliche Arbeitszeit [h] (inkl. Pendelzeit)	7,53	7,51 (2001/02)	12
Tägliche Nicht-Arbeitszeit [h] (inkl. Fahrtzeiten; exkl. Schlaf)	10,47	10,49 (2001/02)	12

[1] destatis(2011) [2] IAB (2011) [3] BMVBS (2010) [4] destatis (2012)

[5] BMVBS (2004) [6] destatis (2010) [7] BMVBS (2012)

[8] Statistische Ämter der Länder (2010) [9] Siedentop (2007)

[10] Small und Verhoef (2007) [11] De Borger und Van Dender (2003)

[12] destatis (2004)

<sup>5</sup> Der Zeitwert  $\theta_{ij} = \left( (1 - \tau^{inc} - w)w_j T - C_{ij} \right) / (L + T_{ij})$  kann mit dem Lagrange-Ansatz des Nutzenmaximierungsproblems der Haushalte hergeleitet werden indem zunächst die Lagrange-Funktion nach  $D_{ij}$  abgeleitet und anschließend der Lagrange-Multiplikator der Zeitbeschränkung (Gleichung 3) –Grenznutzen der Zeit– durch den Lagrange-Multiplikator der Budgetbeschränkung (Gleichung 2) –Grenznutzen des Einkommens– dividiert wird.

**Tabelle 2: Benchmark vs. Empirie**

Elastizitäten	Modell	Literatur
Eigenpreiselastizität der Autofahrten-Nachfrage bezüglich des Benzinpreises	-0,1	(-0,1) – (-0,3) [1]/[2]/[3]/[4]/[5]/[6]
Eigenpreiselastizität der ÖPNV-Nachfrage bezüglich des Fahrpreises	-1,0	(-0,1) – (-1,1) [1]/[2]
Kreuzpreiselastizität der ÖPNV-Nachfrage bezüglich des Benzinpreises	+0,5	(+0,1) – (+0,8) [2]
Eigenpreiselastizität der Benzinnachfrage bezüglich des Benzinpreises	-0,4	(-0,2) – (-0,6) [2]/[4]/[7]

[1] Small und Verhoef (2007) [2] Goodwin (1992) [3] Steiner und Cludius (2010)  
 [4] Goodwin et al. (2004) [5] Graham und Glaister (2004) [6] Hymel et al. (2010)  
 [7] Havranek et al. (2012)

### 3. Infrastruktur

#### 3.1 Straßenfläche und -kapazität

Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt ist die Kapazität jeder einzelnen Straße  $l \in L$  von der zonen-spezifischen Straßenfläche  $B_i$ , der jeweiligen Straßenkategorie, und der Infrastrukturqualität abhängig. Die Straßenfläche  $B_i$  ist ferner durch die zonenspezifischen infrastrukturellen Anforderungen, wie z.B. dem Zugang zu Umgehungs-/Ringstraßen, bedingt. Die Kapazitäten wiederum beeinflussen die straßenspezifischen Geschwindigkeiten und damit Reisezeiten und -kosten und schließlich das Routen- und Verkehrsmittelwahlverhalten.

$$Kap_{i,l} = qf_i B_i \chi \varpi_l, \forall l \in L, \forall i \in I \quad (5)$$

Gleichung (5) zeigt die Berechnung der zur Straßenfläche  $B_i$  proportionalen ( $\chi > 0$ ) Kapazität von Straße  $l$  in Zone  $i$   $Kap_{i,l}$  (Tscharschiew und Hirte, 2010). Der Faktor  $qf_i$  beschreibt die Infrastrukturqualität einer Straße (vgl. Abschnitt 3.3) und Faktor  $\varpi_l$  wird durch die Kategorie von Straße  $l$  bestimmt. Entsprechend realer Beobachtungen nimmt der Anteil der Straßenfläche  $\vartheta_i$  an der Landfläche  $A_i$  mit zunehmender Distanz vom Stadtzentrum ab (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2010; Statistisches Amt München, 2010) und es gilt:  $B_i = \vartheta_i A_i$ .<sup>6</sup> Die Zonen 2 und 6 bilden dabei aufgrund ihrer verkehrlichen wichtigen Funktion –Anbindung der bevölkerungsreichen Vororte an die städtischen Umgehungs-/Ringstraßen– eine Ausnahme.

<sup>6</sup> Der Anteil der Straßen- an der Landfläche in der 'City' (Zonen 3-5) beträgt 15,6 %. Für Berlin betrug der Anteil in 2009 15,3 %, für München 17,2 % und für Hamburg 12,2 % (vgl. Berlin: Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2010; München: Statistisches Amt München, 2010; Hamburg: Statistikamt Nord, 2012).



### 3.2 Entstehung der Infrastrukturschäden

Die Ermittlung der straßenspezifischen Schäden  $Dam_l$  beruht auf der im Benchmark berechneten Auslastung und kraftfahrzeugspezifischen Belastung der jeweiligen Straßen  $l$ . Gemäß der üblichen Berechnungsweise für Straßenschäden findet die Palmgren-Miner-Regel Anwendung (Fatemi und Yang, 1998; BMVBS, 2007 u.a.). Der Palmgren-Miner-Regel (lineare Schadensakkumulationsregel) liegt die Annahme zugrunde, dass die Schädigung der Straßenoberfläche durch die Fahrzeugbelastung linear mit der Anzahl der ertragenen Belastung zunimmt und dass bei  $Dam_l = 1$  üblicherweise ein Schaden auftritt (z.B. Bruch der Straßenoberfläche). Weiterhin wird bei Belastungen mit unterschiedlichen Laststufen  $a$  unterstellt, dass Teilschädigungen  $Dam_{l,a}$  mit unterschiedlichen Laststufen summiert werden dürfen:

$$Dam_l = \sum_a Dam_{l,a} = \sum_a \frac{fzg_{l,a}}{FZG_{l,a}}, \forall l \in L \quad (6)$$

wobei  $fzg_{l,a}$  die tatsächliche Anzahl der Fahrzeuge mit Laststufe  $a$  ist, welche Straße  $l$  nutzen, und  $FZG_{l,a}$  der Anzahl der Fahrzeuge entspricht die Straße  $l$  verkraften kann, bis ein Schaden auftritt.

### 3.3 Qualitätsfaktor der Straßen

Die Qualität einer Straße  $l$  wird mit dem Qualitätsfaktor  $qf_l$ , welcher die Straßenkapazität beeinflusst (vgl. Abschnitt 3.1), abgebildet. Für den Qualitätsfaktor gilt im Benchmark-Fall

$$qf_l^0 = 1, \forall l \in L \quad (7)$$

Durch die Verkehrsbelastung der Straßeninfrastruktur im Benchmark-Fall erleidet diese jedoch Schäden, Qualitäts- und somit Kapazitätseinbußen. Diese wiederum beeinflussen die Entscheidungen der ökonomischen Akteure des räumlichen Gleichgewichtsmodells und führen zu einem gesellschaftlichen Wohlfahrtsverlust  $Loss$ . Für den Schadensfall wird der Qualitätsfaktor auf Basis der Schadensberechnung nach Palmgren-Miner ermittelt. Es gilt:

$$0 \leq qf_l^1 = 1 - \left( \frac{Dam_l}{\sharp} \right) < 1, \forall l \in L \quad (8)$$

Durch die Aufsummierung der Teilschädigungen  $Dam_{l,a}$  kann  $Dam_l$  größer eins werden. Aus pragmatischen und Kalibrierungsgründen wird daher  $Dam_l$  mit dem Faktor  $\sharp$  dividiert.

Wird nun in die Wiederherstellung der Straßenqualität/-kapazität investiert, kann  $qf_l$  wieder den Wert eins annehmen, wenn die Höhe der öffentlichen Investitionen  $Inv$  der Höhe des gesellschaftlichen Schadens  $Loss$  gleicht. Dabei unterliegt die Wiederherstellung der Straßenqualität folgender Funktion:

$$qf_l^2 = qf_l^1 + (1 - qf_l^1)prod \leq 1, \forall l \in L \quad (9)$$

wobei

$$prod = \log_2 \left( 1 + \frac{Inv}{Loss} \right) \quad (10)$$

die Produktivität der öffentlichen Investitionen, welche durch abnehmende Grenzerträge gekennzeichnet ist (de Bruin und Dellink, 2009; de Bruin et al., 2009; Dellink et al., 2010; Egenhofer et al., 2010; Gawel et al., 2012), widerspiegelt.

### 3.4 Wiederherstellung der Straßenqualität

Zur Wiederherstellung der Straßenqualität werden die Produktionsfaktoren Arbeit  $M_j$  und Vorprodukte  $Y_{jk}$  durch eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion miteinander kombiniert:

$$X_j^3 = S_j M_j^\varphi \left( \sum_k \chi_{k|j} Y_{n,k|j}^\sigma \right)^{\frac{\omega}{\sigma}}, \forall j \in I \quad (11)$$

Der konstante Skalenparameter  $S_j$  variiert nach Produktionsstandort und erlaubt, zonenspezifische Hicks-neutrale Produktivitätseffekte abzubilden.  $\varphi$  ist die zonenspezifische Outputelastizität für Arbeit und  $\omega$  die zonenspezifische Outputelastizität für Vorprodukte, es gilt:  $\varphi + \omega = 1$ . Zur Produktion von  $X_j^3$  in Zone  $j$  können Vorprodukte der Industrie  $n = 1$  aus allen Zonen  $k$  verwendet werden. Die räumlich differenzierten Vorprodukte sind mit der Substitutionelastizität  $1/(1 - \sigma) > 1$  imperfekt gegeneinander substituierbar. Die Input-spezifische Konstante  $\chi_{k|j} \geq 1$  ermöglicht weitere Spezifizierungen, wie z.B. die Nichtverwendung eines bestimmten zonenspezifischen Vorprodukts. Der zonenspezifische Output  $X_j^3$  von Industrie  $n = 3$  dient der Wiederherstellung der Qualität der Straßenoberfläche. Unter Beachtung der Produktionsfunktion (Gleichung 4) minimieren die Unternehmen ihre Kosten  $\min_{(M_j, Y_{n,k|j})} M_j w_j + \sum_k (p_k^1 + TrC_{kj}) Y_{1,k|j}$ . Hierbei sind  $M_j w_j$  die Lohnkosten.  $p_k^1$  ist der Preis des Vorproduktes aus Zone  $k$  und  $TrC_{kj}$  sind die erwarteten Transportkosten einer Tour zwischen dem eigenen Produktionsstandort  $j$  und dem Produktionsstandort des Vorproduktunternehmens  $k$ . Eine umfangreiche Herleitung der kostenminimalen Faktornachfrage bietet Nitzsche und Tscharaktschiew (2013).

Der öffentliche Sektor konsumiert das (Service-)Produkt  $X_j^3$  zum Preis  $p_j^3$  und investiert somit in die Wiederherstellung der Straßenqualität. Die dadurch entstehenden Investitionskosten werden zu einem Großteil durch die verschiedenen Finanzinstrumente

- Lohnsteuer       $w$       [%]
- Energiesteuer    $g$       [€/l]
- CO<sub>2</sub>-Steuer     $e$       [€/kg]
- Maut               $t$       [€/Km]

getragen.

Im allgemeinen räumlichen Gleichgewicht gilt:

$$\sum_{j=1}^I p_j^3 X_j^3 = Inv = Inc^{Tot}w + Dist^{Tot}t + Fuel^{Tot}g + CO_2^{Tot}e + \Delta^{Pub} \quad (12)$$

$Inc^{Tot}$  ist das vollständige Arbeitseinkommen der  $N$  Haushalte,  $Dist^{Tot}$  die gesamte mit Pkw oder Lkw zurückgelegte Distanz,  $Fuel^{Tot}$  der gesamte Kraftstoffverbrauch aller Kraftfahrzeuge und  $CO_2^{Tot}$  beschreibt die gesamten durch Kraftfahrzeuge und den ÖPNV emittierten  $CO_2$ -Emissionen. Der Term  $\Delta^{Pub}$  beschreibt die maßnahmenbedingte Veränderung des öffentlichen Budgets, welche ggf. zur Infrastrukturfinanzierung beitragen kann. Das Budgetsaldo  $\Delta^{Pub}$  wird dabei durch veränderte Einnahmen aus Mehrwert-, Einkommens- und Energiesteuer und veränderte Konsumausgaben beeinflusst<sup>7</sup>. Für die vier Maßnahmen-Terme ist zu beachten, dass nicht alle Finanzinstrumente gleichzeitig zur Deckung der Investitionskosten genutzt werden.

#### 4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der verschiedenen Finanzinstrumente zur Wiederherstellung der Infrastrukturqualität vorgestellt. Dabei sollen besonders die Wohlfahrtseffekte hervorgehoben werden. Diese sind eine Kombination aus veränderten Entscheidungen der ökonomischen Akteure (z.B. Routen-, Verkehrsmittelwahl, Nachfragemuster) und aus ökonomischen, umweltlichen und räumlichen Effekten.

Die Wohlfahrtsveränderung der HH und Landbesitzer werden mit der Äquivalenten Variation<sup>8</sup> gemessen, d.h. dem äquivalenten Einkommenstransfer, welcher notwendig ist, um die HH im Benchmark-Fall zu kompensieren, damit diese das gleiche Nutzenniveau wie im Schadens-/Investitionsfall erreichen. Hierzu wird zunächst der städtische Gesamtnutzen, welcher sich aus dem Erwartungswert der maximierten Haushaltsnutzen (Anas und Xu, 1999) ergibt, bestimmt. Unter der Annahme, dass die idiosynkratischen Neigungen  $\varepsilon_{ij}$  der HH für eine bestimmte  $i - j$ -Kombination Gumbel-verteilt sind, gilt für den erwarteten Gesamtnutzen:  $W_H = E[\max_{ij}(V_{ij} + \varepsilon_{ij})]$ . Da der indirekte Nutzen  $V_{ij}$  vom (gesamten ökonomischen) Einkommen  $\Omega_{ij}$ <sup>9</sup> abhängt, kann darauf aufbauend die Äquivalente Variati-

<sup>7</sup> Ausgehend vom Benchmark-Fall wird für die Berechnung des Schadenfalls der mengenmäßige öffentliche Konsum fixiert, damit sämtliche Effekte über den Haushaltsnutzen abgebildet werden können. Um im Schadenfall ein ausreichendes Budget für den fixierten öffentlichen Konsum zu gewährleisten, werden Mehr- bzw. Mindereinnahmen, welche durch ökonomische und räumliche Veränderungen im Schadenfall hervorgerufen werden, mit der Pauschalsteuer  $\tau^{ls}$  ausgeglichen. Diese wird für die Ermittlung der Maßnahmenwirkung schließlich ebenfalls fixiert. Dadurch werden bei der Ausgestaltung der Finanzinstrumente zur Wiederherstellung der Infrastrukturqualität Überschüsse und Defizite im öffentlichen Budget mit beachtet und im Haushaltsnutzen mit abgebildet.

<sup>8</sup> Der Literatur folgend wird die Äquivalente Variation als Proxy für den ökonomischen Schaden verwendet (vgl. z.B. Darwin und Tol, 2001; Houba und Kremers, 2009; Stephan und Schenker, 2011 oder Ciscar et al., 2012).

<sup>9</sup>  $\Omega_{ij} = \theta_{ij}E + (1 - \tau^{inc})RD - \tau^{ls}$  (vgl. Nitzsche und Tscharkschiew, 2013).

on eines durchschnittlichen Haushalts  $EV_H$  wie folgt berechnet werden:  $W_H^0(\Omega_{ij}^0 + EV_H) = W_H^{1,2}(\Omega_{ij}^{1,2})$ . Hierbei entspricht  $W_H^0$  dem Nutzen im Benchmark und  $W_H^{1,2}$  dem Nutzen im Schadens- bzw. Investitionsfall. Die Äquivalenten Variation der nichtstädtischen Landbesitzer  $EV_A$  ergibt sich ebenfalls aus der Gegenüberstellung deren erwarteten maximierten indirekten Nutzen im Benchmark mit denen im Schadens- bzw. Investitionsfall (Nitzsche und Tscharktschiew, 2013).

Die Umwelteffekte werden durch die schadensfall- bzw. investitionsfallbedingten (monetär bewerteten) Veränderungen der reise-/transportbezogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen, Luftverschmutzung, Unfälle und des Lärms dargestellt. Die Aufsummierung der Wohlfahrtsänderungen der HH und Landbesitzer sowie der Umwelteffekte ergibt die aggregierte Wohlfahrtsänderung der Gesellschaft, d.h. den Nettonutzen einer Maßnahme.

Die durch die infrastrukturelle Aus- und Belastung im Benchmark hervorgerufenen Infrastrukturschäden verringern die Straßenkapazität und verlangsamen somit den Straßenverkehr. Die geringere Geschwindigkeit senkt zwar die Verbrauchseffizienz des Autoverkehrs, die Verschiebung des Modal Split zugunsten der Verkehrsmodi ÖPNV und zu Fuß sowie eine geringere Verkehrsnachfrage senken jedoch die städtischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Die zurückgehende Verkehrsnachfrage hat verschiedene Ursachen. Zum einen sind die Produktionsstätten im Schadensfall gleichmäßiger über das Stadtgebiet verteilt wodurch sich die Wege für Pendel-, Einkaufs- und Wirtschaftsverkehre verkürzen. Zum anderen verringern sich aufgrund der erhöhten zeitlichen und monetären Fahrtkosten die Nachfrage nach Vor- und Konsumprodukten sowie das Arbeitsangebot. Die, auf die schadhafte Straßeninfrastruktur zurückzuführende, eingeschränkte Zugänglichkeit/Erreichbarkeit senkt somit auch die Anzahl der Pendel-, Einkaufs- und Wirtschaftsfahrten.

Mit der eingeschränkten städtischen Mobilität einhergehend sinkt der städtische Gesamtnutzen und damit die, mit der Äquivalenten Variation ermittelte, Wohlfahrt der Haushalte um 2,1 Mrd. Euro. Da der Gesamtnutzen und somit die Äquivalente Variation sämtliche ökonomische und räumliche Anpassungseffekte innerhalb der urbanen Ökonomie abbildet, wird dem Parameter *Loss*, welcher den gesellschaftlichen Schaden repräsentiert, der Wert dieses Wohlfahrtsverlustes zugewiesen.

Tabelle 3: Ergebnisse

	Benchmark	Schadensfall	Lohnsteuer 1,2 %	Energiesteuer 1,42 €/l	CO <sub>2</sub> -Steuer 0,38 €/Kg	Maut 0,12 €/Km
<b>Maut-Äquivalent</b>						
			0,09 €/Km	0,08 €/Km	0,12 €/Km	0,12 €/Km
<b>Verkehr</b>						
Ø Geschwindigkeit	31,7 Km/h	27,0 Km/h	30,6 Km/h	36,0 Km/h	34,5 Km/h	37,1 Km/h
Modal Split <sup>a</sup>	52/18/30	27/40/33	++/--/0	++/--/0	+++/--/0	+/-/0
Auto/ÖPNV/Fuß						
Staukosten <sup>b,c</sup>	2,1 Mrd. €	1,7 Mrd. €	+24,9	-23,1	-7,4	-36,8
Verbrauchseffizienz <sup>b</sup>	12,6 Km/l	11,4 Km/l	+9,0	+40,1	+16,8	+21,4
CO <sub>2</sub> -Emissionen <sup>b</sup>	3,3 Mio. t	2,5 Mio. t	+27,2	+1,14	+19,9	+7,5
<b>Öffentlicher Haushalt [Milliarden Euro]</b>						
Zusatzsteuer			0,64	1,09	1,13	1,28
Budgetsaldo $\Delta^{Pub}$			0,89	1,02	0,97	0,80
Steuereinnahmen	23,3	23,2	24,8	25,4	25,4	25,3
<b>Räumliche Anpassung</b>						
Urbanisierung HH <sup>d</sup>		0	-	+++	++	++
Urbanisierung UN <sup>d</sup>		-	-	+	+	+
<b>Wohlfahrt (Wf.)</b>						
erw. Gesamtnutzen <sup>d</sup>	7,5480	7,5273	7,5296	7,5326	7,5306	7,5317
Aggregierte Wf. <sup>e</sup>		-2,40 Mrd. €	-2,11 Mrd. €	-1,41 Mrd. €	-1,70 Mrd. €	-1,43 Mrd. €

<sup>a</sup>(Stark) Steigende bzw. fallende Werte im Vergleich zum Schadensfall sind mit (++) bzw. (--) gekennzeichnet.

<sup>b</sup>Maßnahmen-Spalten zeigen relative Änderung im Vergleich zum Schadensfall [%].

<sup>c</sup>Mit Zeitwert bewertete Fahrzeit. Vergleich Free-Flow-Fahrzeit mit Stau-Fahrzeit.

<sup>d</sup>Erwartungswert der maximierten Haushaltsnutzen.

<sup>e</sup>Aufsummierung der Wohlfahrtsänderungen (Äquivalente Variation der HH und UN) und der Umwelteffekte.

Durch die öffentlichen Investitionen ( $0 < Inv \leq Loss$ ) in die Wiederherstellung der Infrastrukturqualität und Straßenkapazität wird der Straßenverkehr wieder beschleunigt und gewinnt an Attraktivität. Hierdurch steigt der Anteil des Autoverkehrs am Modal Split im Vergleich zum Schadensfall und senkt damit die Fahrtzeiten der Haushalte und Unternehmen. Die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr sowie eine effizientere Fahrweise erhöhen weiter die Verbrauchseffizienz. Neben höheren Geschwindigkeiten verringert die Wahl zentraler Wohnlagen die erwarteten Fahrtzeiten und -kosten für Pendel- und Einkaufsfahrten. Als weitere Strategie zur Senkung der zusätzlichen Abgabenlast wählen die Verkehrsteilnehmer häufiger Routen auf innerstädtischen Straßen. Trotz der häufigeren Autonutzung besonders im innerstädtischen Bereich sinken die Staukosten bei den verkehrsspezifischen Finanzinstrumenten im Vergleich zum Schadensfall. Weil es besonders bei diesen Maßnahmen für die Gesellschaft vorteilhaft ist die Schadenskosten vollständig ( $Inv = Loss \sim qf_t^2 = qf_t^0$ ) in den Erhalt der Straßenqualität zu investieren (vgl. Abbildung 2) steht dem Kfz-Verkehr die Straßenkapazität wieder in vollem Umfang zur Verfügung und senkt damit deren Stauanfälligkeit. Sind die Wiederherstellungskosten hingegen lohnsteuerfinanziert sollte die Gesellschaft nur rund 70-80 % des entstandenen Schadens investiert. Hierdurch gewinnt der Verkehrsträger Straße an ausreichend Attraktivität, dass der Auto-Anteil am Modal Split ähnlich hoch ist wie bei den verkehrsspezifischen Finanzinstrumenten. Die Straßenqualität und -kapazität kann jedoch nicht vollständig wiederhergestellt werden ( $qf_t^2 < qf_t^0$ ) wodurch vergleichsweise mehr Staus entstehen. Der Vergleich des Modal Splits, der Durchschnittsgeschwindigkeit und Staukosten sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Investitionsfall (Investitionen für den Erhalt der Straßenqualität und -kapazität notwendig) mit denen im Benchmark (schadlose Straßeninfrastruktur, keine Investitionen notwendig) zeigt, dass die Einführung/Erhöhung der Maut, Energie- und CO<sub>2</sub>-Steuer<sup>10</sup> den Modal Split zugunsten des ÖPNV verschiebt, wodurch der Straßenverkehr weniger stauanfällig ist und die Durchschnittsgeschwindigkeit zunimmt. Zudem sinken die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen obwohl die Verkehrsnachfrage speziell bei den verkehrsspezifischen Maßnahmen mit der im Benchmark vergleichbar ist<sup>11</sup>.

Die Erneuerung der Infrastrukturqualität, welche wie die Produktion von Konsumprodukten den Einsatz von Arbeit und Vorprodukten erfordert, erhöht die Arbeitsnachfrage und den Druck auf den Landmarkt, dessen Angebot exogen gegeben ist<sup>12</sup>. Dadurch steigen Arbeits- und Mieteinkommen der Haushalte, welche aufgrund der höheren Mieten jedoch ihre Landnachfrage reduzieren. Die Nachfrage der HH nach Konsumgütern hingegen steigt, da deren Preis im Vergleich zu den Gütern Land und Freizeit relativ billiger ist auch wenn er

<sup>10</sup> Bei dem Vergleich dieser Ergebnisse muss beachtet werden, dass die Finanzinstrumente nicht zur Optimierung der Wohlfahrt, sondern zur Finanzierung der Erhaltungs-/Wiederherstellungskosten erhoben werden. Hirte und Nitzsche (2013) zeigen u.a., dass die Einführung einer Maut zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen den städtischen Gesamtnutzen sowie die aggregierte Wohlfahrt über das Benchmarkniveau steigern kann.

<sup>11</sup> Die höheren Fahrtkosten beschränken die HH in ihrer Nachfrage nach Konsumgütern, wodurch weniger Einkaufsverkehr entsteht. Die Anzahl von Pendel- und Wirtschaftsfahrten hingegen steigt und erhöht die gesamte städtische Verkehrsnachfrage.

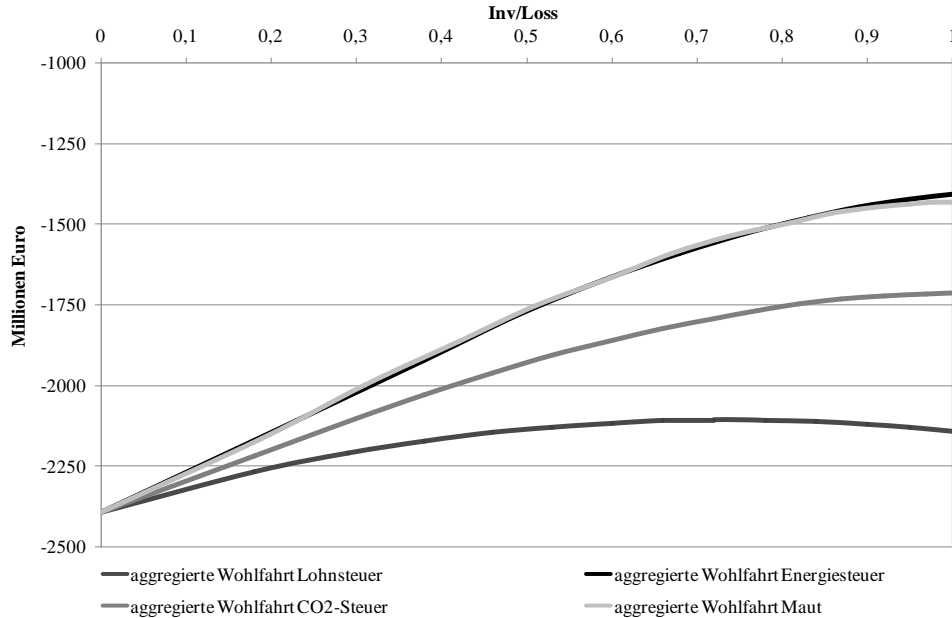
<sup>12</sup> Zur Produktion von Vorprodukten wird neben dem Faktor Arbeit auch der Faktor Land eingesetzt. Somit führt die gesteigerte Nachfrage nach Vorprodukten zu mehr Wettbewerb um die exogen gegebene Landfläche.

absolut marginal steigt. Die Erneuerung der Infrastruktur verbessert weiterhin die Mobilität und Zugänglichkeit zu den räumlich differenzierten Güter- und Produktionsstandorten und vereinfacht somit die Vielfältigkeit im Konsum. Neben den HH profitieren auch die nicht-städtischen Landbesitzer von den höheren Mieteinnahmen und den nur geringfügig gestiegenen Güterpreisen. Durch die veränderte Zusammensetzung des Güterbündels der HH steigt der städtische Gesamtnutzen (vgl. Tabelle 3) wie auch der Nutzen der Landbesitzer.

Durch die höhere Arbeits- und Konsumnachfrage wie auch den höheren Bedarf an Vorprodukten nehmen, im Vergleich zum Schadensfall, die gesamte Verkehrsnachfrage und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen zu. Zusätzlich führt die Verlagerung des Straßenverkehrs auf die lokalen, durch bevölkerungsreiche Gebiete verlaufenden, Straßen zu einer höheren Lärm- und Luftbelastung. Die Unfallkosten sind aufgrund des gleichmäßigeren und flüssigeren Straßenverkehrs hingegen rückläufig. Die gesamten externen Kosten nehmen dennoch zu. Da die Nutzengewinne der HH und nicht-städtischen Landbesitzer die negativen Umwelteffekte bei weitem übersteigen nimmt die aggregierte Wohlfahrt im Vergleich zum Schadensfall trotzdem zu. Wie in Tabelle 3 ersichtlich erleidet die Gesellschaft im Vergleich zum Benchmark, trotz wiederhergestellter Infrastrukturqualität, einen Wohlfahrtsverlust. Ursächlich hierfür ist u.a. die höhere Belastung der Einkommen durch die Finanzinstrumente. Besonders die verkehrsspezifischen Maßnahmen verteuern Pendel-, Einkaufs- und Wirtschaftsfahrten. Das veränderte Verkehrsverhalten führt zu höheren durchschnittlichen Fahrtzeiten, welche, im Vergleich zum Benchmark, das Zeitbudget zusätzlich belasten. Somit schränken die Finanzinstrumente im Vergleich zum Benchmark, in dem die Infrastruktur keinen Schaden aufweist, die Erreichbarkeit/Zugänglichkeit ebenfalls ein. Im Vergleich zum Schadensfall in dem die schlechte Infrastrukturqualität und unzureichende Straßenkapazität den Straßenverkehr erheblich behindert ist die Erhebung dieser Abgaben in Verbindung mit deren zweckgebundener Nutzung für den Erhalt der Straßenqualität und -kapazität für die Gesellschaft jedoch nutzenstiftend und dem Schadensfall vorzuziehen.

Da der mengenmäßige öffentliche Konsum fix ist, erhöhen die steigenden Güterpreise auf der einen Seite die öffentlichen Konsumausgaben. Das höhere Arbeits- und Mieteinkommen der HH sowie die höhere Güter- und Verkehrsnachfrage steigern jedoch auf der anderen Seite die öffentlichen Einnahmen aus Einkommens-, Mehrwert- und Energiebesteuerung. Die Mehreinnahmen übersteigen die Mehrausgaben (vgl. Tabelle 3) und können für die Deckung der Investitionskosten verwendet werden, wodurch die zusätzliche Belastung der HH durch die einzelnen Finanzinstrumente sinkt. Somit trägt der positive Budgetsaldo des öffentlichen Haushalts zu 38-58 % zur Wiederherstellung der Infrastrukturqualität bei.

Abbildung 2 zeigt die aggregierten Wohlfahrtseffekte der vier Finanzinstrumente zur Erneuerung der Infrastrukturqualität. Die horizontale Achse zeigt das Verhältnis zwischen den öffentlichen Investitionen in die Infrastrukturqualität und den Schadenskosten. Die vertikale Achse zeigt die aggregierte Wohlfahrt, d.h. den Nettonutzen der jeweiligen Maßnahme.

**Abbildung 2: Wohlfahrtseffekte öffentlicher Investitionen in die Infrastrukturqualität**

Für die Finanzinstrumente Maut, Energie- und CO<sub>2</sub>-Steuer ist es sinnvoll, die durch die Infrastrukturschäden entstandenen, gesellschaftlichen Kosten in voller Höhe in die Wiederherstellung der Infrastrukturqualität zu investieren, wie Abbildung 2 zeigt. Hierbei betrüge die nutzungsabhängige Maut<sup>13</sup> 0,12 €/km, die erweiterte, noch nicht mehrwertbesteuerte, Energiesteuer 1,42 €/1 Kraftstoff und die CO<sub>2</sub>-Steuer 0,38 €/kg CO<sub>2</sub>. Für die lohnsteuergestützte Finanzierung der Wiederherstellungskosten gilt, dass nur rund 70-80 % des entstan-

<sup>13</sup> Nach Mohring und Harwitz (1962) können die Kapitalkosten einer Straße mit optimaler Kapazität durch die Erhebung einer wohlfahrtsoptimalen Maut gedeckt werden. Mit einem umfangreichen Literaturüberblick zeigen Verhoef und Mohring (2007) dass dieses Theorem nicht nur theoretische Gültigkeit besitzt. Dennoch basiert es auf einer Vielzahl von Annahmen welche das vorliegende Gleichgewichtsmodell nicht erfüllt. Während Mohring und Harwitz (1962) konstante Skalenerträge für den Straßenbau annehmen, wird in dem vorliegenden Modell eine abnehmenden Grenzproduktivität für die öffentlichen Investitionen (vgl. de Bruin und Dellink, 2009; de Bruin et al., 2009; Dellink et al., 2010; Egenhofer et al., 2010; Gawel et al., 2012) in die Infrastrukturqualität und damit Kapazität angenommen. Mohring und Harwitz (1962) nehmen weiterhin eine optimale, kontinuierlich anpassungsfähige und Nutzungs- und Bereitstellungskosten minimierende Straßenkapazität an. In dem verwendeten Stadtmodell hingegen ist die Straßenkapazität im Benchmark zunächst Bestandteil der Kalibrierung und abhängig von der zonenspezifischen Landfläche (vgl. z.B. Nitzsche und Tscharaktschiew, 2013; Tscharaktschiew und Hirte, 2010). In den folgenden Untersuchungsfällen wird die Benchmark-Kapazität dagegen durch die Qualitätsfaktoren  $qf_i^1$  und  $qf_i^2$  beeinflusst. Diese werden jedoch nur durch das 'exogene' Verhältnis  $Inv/Loss$  bestimmt und nicht von stauabhängigen Kapazitätskosten, welches nach Mohring und Harwitz (1962) eine optimale Straßenkapazität herbeiführen kann. Des Weiteren sind modellspezifische Effekte (z.B. Steuerinteraktions- und Umverteilungseffekte) ursächlich, dass eine stauoptimale Maut zur vollständigen Deckung der Schadenskosten nicht geeignet ist (vgl. Hirte et al., 2014).



den gesellschaftlichen Schadens investiert werden sollten, da nach diesem Level ein Mehr an Infrastrukturinvestition die gesellschaftliche Wohlfahrt nicht weiter verbessert, sondern verschlechtert. Der Lohnsteuersatz betrüge 1,2 %.

Dass die erweiterte Energiesteuer als Finanzinstrument eine marginal höhere Wohlfahrtsverbesserung als die Maut herbeiführt, ist in der effizienteren Kraftstoffnutzung (vgl. Tabelle 2 und 3) begründet. Zum einen erleiden die Haushalte dadurch eine vergleichsweise geringere Belastung (vgl. Tabelle 3) und zum anderen werden weniger CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und andere luftverschmutzende Stoffe emittiert. Beide Instrumente sind der Erhebung einer CO<sub>2</sub>-Steuer, welche nicht nur den schadenverursachenden Pkw- und Lkw- sondern auch den öffentlichen Personenverkehr betrifft, und der Erhebung einer vollständig verursacherunspecifischen Lohnsteuer zur Infrastrukturfinanzierung vorzuziehen. Ursächlich hierfür ist, dass die entstehenden Investitionskosten/Abgabenlasten bei der nicht-verursachergerechten Kostenaufteilung durch die Vorteile der verbesserten Infrastrukturqualität nicht vollständig ausgeglichen werden können.

## 5. Zusammenfassung

Die Nutzung des räumlichen, für eine durchschnittliche deutsche Stadt kalibrierten, Gleichgewichtsmodells zur Untersuchung der Auswirkungen einer schadhafte Straßeninfrastruktur und der, durch Sonderabgaben finanzierter, Erneuerung dieser ermöglicht die Betrachtung ökonomischer und standortabhängiger wie auch verkehrlicher Anpassungsstrategien von Haushalten und Unternehmen. Somit können die Auswirkungen der Infrastrukturqualität auf das Verkehrsverhalten und zudem dessen Einfluss auf das Standort- und Konsumverhalten der ökonomischen Akteure untersucht werden. Neben dem Verkehrsverhalten beeinflussen die zusätzlichen Finanzinstrument zur Behebung der Schäden die Einkommen und Ausgaben der Haushalte und Unternehmen und somit deren Standortentscheidungen, welche wiederum das Verkehrsverhalten mitbestimmen, auch direkt. Damit ermöglicht dieser Ansatz die allumfassende Bewertung der, durch zusätzliche Abgaben finanzierten, Investitionen in den Erhalt der Straßenqualität und -kapazität.

Während die Mobilität und Wohlfahrt unter maroder Straßenqualität und Substanzverlusten leidet, verbessern Investitionen in das schadhafte Straßennetz Erreichbarkeit und Zugänglichkeit und beschleunigen den Verkehr. Neben verkürzten Reisezeiten und mehr verfügbarer Zeit für Freizeit profitieren die Haushalte von einer höheren Arbeitsnachfrage, einem höheren Mietekommen und einfacherem vielfältigem Konsum, wodurch der Nutzen der Haushalte steigt. Die abnehmende Grenzproduktivität wie auch die Finanzierungskosten der Infrastrukturinvestitionen und die negativen Umwelteffekte belasten jedoch die gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass Investitionen in die Infrastrukturqualität nutzerfinanziert und die Kosten verursachergerecht verteilt sein sollten, um Wohlfahrtsverluste durch Investitionskosten zu minimieren. Hierbei sind die Maßnahmen Erhöhung der Energiesteuer und Einführung einer allgemein gültigen Maut den Maßnahmen Erhöhung der Lohnsteuer und Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer vorzuziehen.

Die Kalibrierung des Modells für eine konkrete Stadt würde es ermöglichen, spezifische Besonderheiten zu beachten, und könnte Entscheidungsträger beim Verstehen von Konsequenzen bestimmter Maßnahmen unterstützen. Im Rahmen des BMBF-Projekts EMPACCA wird ein entsprechender Ansatz für die Stadt bzw. Metropolregion Hamburg vorbereitet.

## 6. Danksagung

Dieser Artikel wurde im Rahmen des Projektes "Evaluating Measures on Climate Protection and Adaptation to Climate Change in Agglomerations (EMPACCA)", welches Teil des BMBF-Förderschwerpunkts "Ökonomie des Klimawandels" ist, verfasst. Ich bedanke mich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Unterstützung. Des Weiteren bedanke ich mich bei Prof. Georg Hirte, Dr. Stefan Tscharaktschiew und Tobias Weber sowie zwei anonymen Gutachtern.

## 7. Abstract

Insufficient investments in road network preservation impairs its functionality. Road wear and tear and the associated capacity overload and congestion affect beside traffic-related decisions also economic and spatial decisions of firms and households. To determine the social costs due to road damages as well as the impacts and welfare changes due to public investments in road infrastructure a spatial general equilibrium model, calibrated for an 'average' German metropolitan area, is used. The necessary public investments will either be financed by a wage tax (1); an energy tax (2) or a distance-related toll for private and commercial road traffic (3); or a CO<sub>2</sub> tax raised for travelling by automobile, commercial vehicles and public transport (4).

Comparing the welfare effects of the four financial instruments our results show that the instruments (2) and (3) are most appropriate for completely replacing the road damages. Instrument (4) is suitable for a completely replacement, too, but induces less welfare improvement. In contrast, if public investments are financed by wage taxes only about 75 % of the social costs due to road damages should be reinvested. Hence, in order to reduce welfare losses due to funding costs the replacement investments should be user funded.

## 8. Quellen

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2010), Statistischer Bericht: Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung in Berlin 2009, [www.statistik-berlin-brandenburg.de/statistiken/inhalt-statistiken.asp](http://www.statistik-berlin-brandenburg.de/statistiken/inhalt-statistiken.asp).

- Anas, A., Liu, Y. (2007), A regional economy, land use, and transportation model (RELU-TRAN): formulation, algorithm design, and testing, *Journal of Regional Science*, 47, 415–455.
- Anas, A., Xu, R. (1999), Congestion, land use, and job dispersion: a general equilibrium model, *Journal of Urban Economics*, 45, 451–473.
- de Borger, B., Van Dender, K. (2003), Transport tax reform, commuting, and endogenous values of time, *Journal of Urban Economics*, 53, 510–530.
- de Bruin, K.C., Dellink, R.B. (2009), How Harmful are Adaptation Restrictions, *FEEM Working Paper*, Nr. 58, 43 S.
- de Bruin, K.C., Dellink, R.B., Tol, R.S.J. (2009), AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model, *Climatic Change*, 95, 63–81.
- BMVBS (2012), Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010, Keine Wirtschaft ohne Verkehr! Empirischer Einblick in die häufig unterschätzten Dimensionen des Wirtschaftsverkehrs.
- BMVBS (2010), Mobilität in Deutschland 2008 – Ergebnisbericht.
- BMVBS (2007), Aktualisierung der Wegekostenrechnung für die Bundesfernstraßen in Deutschland.
- BMVBS (2004), Mobilität in Deutschland 2002 – Ergebnisbericht.
- Ciscar, J.C., Nicholls, R., Pycroft, J. (2012), The Impacts of Passing Climate Change Tipping Points: A CGE assessment for Europe of rapid sea-level rise, Präsentiert auf der 15th Annual Conference on Global Economic Analysis, Geneva, Switzerland.
- Daehre, K.-H. (2012), Bericht der Kommission "Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung", [www.muenchen.ihk.de/de/standortpolitik/Anhaenge/abschlussbericht-daehre-kommission.pdf](http://www.muenchen.ihk.de/de/standortpolitik/Anhaenge/abschlussbericht-daehre-kommission.pdf).
- Darwin, R.F., Tol, R.S.J. (2001), Estimates of the Economic Effects of Sea Level Rise, *Environmental and Resource Economics*, 19, 113–129.
- Dellink, R.B., De Bruin, K.C., Van Ierland, E.C. (2010), Incentives for international cooperation on adaptation and mitigation, In: Martens, P., Chang, C.T. (Eds.), *The Social and Behavioural Aspects of Climate Change: Linking Vulnerability, Adaptation and Mitigation*, Greenleaf Publishing Ltd, Sheffield, UK, 252–274.

destatis (2012), Pressemitteilung, Nr. 93 vom 15.03.2012.

destatis (2011), Statistisches Jahrbuch Deutschland 2011.

destatis (2010), STATmagazin, Umwelt, Trend zum spritsparenden Auto bremst Kraftstoffverbrauch.

destatis (2004), Datenreport 2004.

DStGB (2014), Verkehrspolitik.  
[www.dstgb.de/dstgb/Home/Schwerpunkte/Verkehrspolitik/](http://www.dstgb.de/dstgb/Home/Schwerpunkte/Verkehrspolitik/).

Egenhofer, C., Nuñez-Ferrer, J., Löschel, A., Sturm, B., Dannenberg, A., Osberghaus, D., Reif, C., Kremers, J., Behrens, A., Georgiev, A., Mortensen, J., Heller, P.S. (2010), *The fiscal Implications of Climate Change Adaptation, Final Report*, CEPS, ZEW.

Fatemi, A., Yang, L. (1998), Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials, *International Journal of Fatigue*, 20, 9–34.

Gawel, E., Heuson, C., Lehmann, P. (2012), Efficient public adaptation to climate change – An investigation of drivers and barriers from a Public Choice perspective, *UFZ Discussion Paper*, 14, 1–28.

Goodwin, P.B. (1992), A review of new demand elasticities with special reference to short and long run effects of price changes, *Journal of Transport Economics and Policy*, 26, 155–163.

Goodwin, P.B., Dargay, J., Hanly, M. (2004), Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: a review, *Transport Reviews*, 24, 275–292.

Graham, D.J., Glaister, S. (2004), Road traffic demand elasticity estimates: a review, *Transport Reviews*, 24, 261–274.

Havranek, T., Irsova, Z., Janda, K. (2012), Demand for gasoline is more price-inelastic than commonly thought, *Energy Economics*, 34, 201–207.

Hirte, G., Nitzsche, E. (2013), Evaluating Policies to Achieve Emission Goals in Urban Road Transport, *Zeitschrift für Verkehrswissenschaften*, 84 (2), 112–137.

Hirte, G., Nitzsche, E., Tscharaktschiew, S. (2014), Optimal Adaptation in Cities: A CGE analysis of economic and spatial effects, Präsentiert auf dem 5th World Congress of Environmental and Resource Economists, Istanbul, Türkei, 47 S.

- Houba, H., Kremers, H. (2009), Environmental Damage and Price Taking Behaviour by Firms and Consumers, *DIW Discussion Paper*, 878, 1–29.
- Hymel, K.M., Small, K.A., Van Dender, K. (2010), Induced demand and rebound effects in road transport, *Transportation Research Part B: Methodological*, 44, 1220–1241.
- IAB (2011), IAB-Kurzbericht, Nr. 19/2011.
- Knoll, E. (Hrsg.) (2007), Der Elsner 2008, *Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen. Elsner*, Wiesbaden.
- Nitzsche, E., Tscharaktschiew, S. (2013), Efficiency of speed limits in cities: A spatial computable general equilibrium assessment, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 56, 23–48.
- Mohring, H. and M. Harwitz (1962), *Highway Benefits: An Analytical Framework*, Evanston, Illinois: Northwestern University Press.
- Reidenbach, M., Bracher, T., Grabow, B., Schneider, S., Seidel-Schulze, A. (2008), *Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen. Ausmaß, Ursachen, Folgen, Strategien*, Difu - Stadt Forschung Praxis, Bd. 4.
- Siedentop, S. (2007), *Auswirkungen der Beschäftigungssuburbanisierung auf den Berufsverkehr – Führt die Suburbanisierung der Arbeitsplätze zu weniger Verkehr? Informationen zur Raumentwicklung*, Heft 2/3 2007, The Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development (BBSR).
- Small, K.A., Verhoef, E.T. (2007), *The Economics of Urban Transportation*, Routledge, Abingdon.
- Statistische Ämter der Länder (2010), Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder.
- Statistisches Amt München (2010), Die Gliederung des Stadtgebietes nach Bodennutzungsarten in ha, [www.muenchen.de/rathaus/Stadtinfos/Statistik/Geografie/archiv](http://www.muenchen.de/rathaus/Stadtinfos/Statistik/Geografie/archiv).
- Statistikamt Nord (2012), Bodenflächen in Hamburg und Schleswig-Holstein am 31.12.2011 nach Art der tatsächlichen Nutzung, [www.statistik-nord.de/daten/bevoelkerung-und-gebiet/gebietsgliederung-hamburg/](http://www.statistik-nord.de/daten/bevoelkerung-und-gebiet/gebietsgliederung-hamburg/).
- Steiner, V., Cludius, J. (2010), Ökosteuer hat zu geringerer Umweltbelastung des Verkehrs beigetragen, *DIW Wochenbericht*, 13–14.

Stephan, G., Schenker, O. (2011), Buying Greenhouse Gas Insurance: International Trade and the Adaptation to Climate Change and Variability, *NCCR TRADE Working Paper*, 37.

Tscharaktschiew, S., Hirte, G. (2010), The drawbacks and opportunities of carbon charges in metropolitan areas – A spatial general equilibrium approach, *Ecological Economics*, 70, 339–357.

Verhoef, E.T., Mohring, H. (2007), Self-Financing Roads, *Tinbergen Institute Discussion Paper*, TI 2007-068/3.