

## Kosten-Nutzen-Untersuchungen kooperativer Verkehrstelematik

VON WOLFGANG NIEBEL, BERLIN, UND JUDITH GEßENHARDT, MÜNCHEN

### 1. Motivation und Aufbau

Für Bund und Länder sind „angemessene Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen“ für „finanzwirksame Maßnahmen“ im Haushaltsgrundsätzegesetz vorgeschrieben (vgl. §6 Abs. 2 HGrG). Demzufolge sind auch Verkehrsinfrastrukturprojekte bspw. einer volkswirtschaftlichen Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) zu unterziehen. Für Straßen können dafür je nach überörtlicher Bedeutsamkeit und Ausdehnung des Projektes die etablierten Bewertungsverfahren entweder des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) oder der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS/RWS) Verwendung finden. Neben dem Verkehrswege(aus)bau werden seit mehr als einem Jahrzehnt auch kollektiv wirksame stationäre Telematiksysteme durch die Baulasträger zum Einsatz gebracht, die im Idealfall eine kostengünstige Alternative zum Tiefbau darstellen können („Bytes statt Beton“).

Eine ab dem Jahr 2015 einzuführende Variante der Verkehrstelematik für den individuellen Anwendungsfall sind kooperative Systeme (Car2Car, 2012). Diese nutzen die funkgestützte Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander (V2V) sowie mit der stationären Infrastruktur (V2I) zum Datenaustausch. Die daraus gewonnenen hochaktuellen Informationen können sowohl in Fahrerinformations- und Assistenzsystemen als auch in den Verkehrssteuerungs- und -regelungsanlagen zu den Zielen einer sichereren, effizienteren und umfeldfreundlicheren Verkehrsgestaltung beitragen.

Zur Markteinführung dieser neuartigen Systeme muss nun „beurteilt werden, ob eine Einführung kooperativer Systeme möglich ist und wie ein Einführungsszenario konkret ausgestaltet werden könnte“ (BMVBS, 2012). Dabei ist zu beachten, dass sowohl die privat(wirtschaftlich)en Fahrzeughalter eine Kaufentscheidung für die im Fahrzeug notwendigen Technikbestandteile fällen müssen, als auch die öffentliche Hand in Form der Baulasträger für die infrastrukturseitigen Technikbestandteile. Da die Fahrzeughalter in ihrer Kaufentscheidung nur ihren individuell wahrnehmbaren Nutzen berücksichtigen und nicht die Effekte für andere Verkehrsteilnehmer sowie die Allgemeinheit, ist zu erwarten, dass eine vom Markt gesteuerte Selbsteinführung kooperativer Systeme unwahrscheinlich ist. Daraus resultiert im Normalfall, dass volkswirtschaftlich zu wenig vom betreffenden Gut bereitgestellt wird. In diesem Fall kann es sogar sein, dass bei einer Marktlösung manche koopera-

---

*Anschrift der Verfasser:*

Dipl.-Ing. Wolfgang Niebel  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Rutherfordstraße 2  
12489 Berlin  
e-mail: wolfgang.niebel@dlr.de

Dipl.-Verk.wirtsch. Judith Geßenhardt  
TU München  
Lehrstuhl für Verkehrstechnik  
Arcisstraße 21  
80333 München  
e-mail: judith.gessenhardt@tum.de

tive, infrastrukturbasierte Fahrerassistenzsysteme gar nicht angeboten werden. Genau dies begründet einen staatlichen Eingriff, der im Regelfall mit einer Subventionierung des betreffenden Sektors verbunden ist. Eine Entscheidung diesbezüglich kann allerdings nur bei ausreichender Kenntnis über die flächendeckende Wirkung kooperativer Systeme in den jeweiligen Anwendungsbereichen erfolgen.

Die technische Wirkung und Funktionalität kooperativer Fahrerassistenzsysteme wurde bereits in diversen Projekten und Feldversuchen untersucht (Sicherere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland, 2013), jedoch nur mit wenigen ausgerüsteten Fahrzeugen. Um die damit verbundenen verkehrlichen Wirkungen bei höheren Ausstattungsgraden zu ermitteln, werden u.a. mikroskopische Verkehrssimulationen eingesetzt. Deren Untersuchungsräume sind allerdings aufgrund der nötigen Detailschärfe und Untersuchungskosten meist ortsspezifisch, zeitlich und räumlich begrenzt und damit schwer übertragbar. Um dennoch den Entscheidungsträgern in Deutschland flächendeckend ohne aufwändige Untersuchungen sinnvolle Empfehlungen geben zu können, ist es wichtig, vorhandene detaillierte Ergebnisse in übertragbare Aussagen zu überführen. Hierfür ist es notwendig, maßgebliche Eigenschaften von Untersuchungsbereichen bzw. Netzelementen zu analysieren, um die gewonnenen Erkenntnisse über die Wirkungen in den o.g. Zielfeldern auf ähnliche Bereiche anderer Städte zu übertragen. Bisherige Ansätze in Forschungsprojekten wie AMITRAN (2013) verwendeten dazu ungenügend ausgearbeitete Ansätze wie durch Parameter beschriebene Situationen, welche bspw. anhand der Fahrleistung in ähnlichen Situationen extrapoliert werden sollten.

In diesem Beitrag findet die im Rahmen der Forschungsinitiative UR:BAN<sup>1</sup> entwickelte Methodik zur räumlichen Hochrechnung verkehrlicher Wirkungen von kooperativen Systemen am Beispiel der entwickelten Anwendungen der F&E-Projekte KOLINE<sup>2</sup> und eCoMove<sup>3</sup> Anwendung. Dazu werden zunächst die Funktionalitäten der verwendeten kooperativen Systeme aus verkehrlich-technischer Sicht skizziert. Anschließend wird die Methodik zur räumlichen Übertragung lokaler, mikroskopisch ermittelter verkehrlicher Wirkungen der Systeme erläutert. Dabei wird konkret auf die Ermittlung häufiger Netzelemente als Basis für die Hochrechnung eingegangen. Im weiteren Verlauf des Berichts wird das Konzept der Bewertung mittels Mikrosimulationen näher erläutert. Um weiterhin auch aus volkswirtschaftlicher Sicht Antworten geben zu können, wird die ökonomische Bewertung verkehrlicher Wirkungen mittels Kosten-Nutzen-Analyse vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Hochrechnung der ermittelten Ergebnisse. Daraus gezogene Schlussfolgerungen sowie Ansätze für die zu führende Diskussion beinhaltet das abschließende Kapitel.

---

<sup>1</sup> Urbaner Raum – Benutzergerechnete Assistenzfunktionen und Netzmanagement

<sup>2</sup> Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen

<sup>3</sup> Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency

## 2. Kooperative Telematikanwendungen

Der Fokus in den Forschungsprojekten KOLINE, eCoMove und UR:BAN liegt auf infrastrukturbasierten kooperativen Systemen, welche in den Netzbereichen *Zufahrt*, *signalisierter Knotenpunkt* und *signalisierter Streckenzug* ihre Wirkungen entfalten. Nachfolgend wird daher ein kurzer Einblick in die Funktionsweise und intendierte Wirkung dieser Systeme gegeben.

### 2.1 Kommunikationstechnologie

Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur stellt eine notwendige Voraussetzung für die Anwendungen dar, wird aber nicht isoliert bewertet. Fahrzeugseitig sind eine On-Board Unit (OBU) und straßenseitig ggf. Road Side Units (RSU) notwendig. Während einige Funktionen auf dem Datenaustausch zwischen einer Zentrale und den Fahrzeugen über das Mobilfunknetz beruhen und dementsprechend vorhandene Mobilgeräte als OBU dienen können, erfordern die nachfolgend vorgestellten Funktionen eine lokale Funkkommunikation. Diese wird in den meisten Fällen über WLAN nach Standard IEEE 802.11-2012 realisiert, in welchen der ehemalige Standard IEEE 802.11p integriert wurde. Die maximale Funkreichweite in urbanen Gebieten wird mit 500m angenommen. Dies hat Auswirkungen auf die notwendige Anzahl und Platzierung der RSUs und somit auf die Systemkosten.

### 2.2 LSA-Optimierung

Die Funktionsgruppe LSA-Optimierung in eCoMove nutzt die Fahrzeug→Infrastruktur-Kommunikation (V2I). Die zwei hier betrachteten Funktionen dieser Gruppe erzeugen Grüne Wellen in zuvor identifizierten Netzabschnitten<sup>4</sup> und priorisieren Freigaben an einzelnen Kreuzungen gemäß situativ ermittelter Gewichte<sup>5</sup>. Beide Funktionen stützen sich auf ein zuvor erzeugtes makro-/ mesoskopisches Verkehrszustandsmodell<sup>6</sup>, welches u.a. auf empfangene Fahrzeugdaten (V2I) zurückgreift (eCoMove, 2013).

Für die Grünen Wellen werden Versatzzeit und Progressionsgeschwindigkeit optimiert unter der Annahme, dass der Fahrzeugpulk (auch: Platoon) mittels Infrastruktur→Fahrzeug-Kommunikation entsprechend beeinflusst werden kann (vgl. 2.3) (eCoMove, 2011). Optimierungskriterien sind sowohl die durch Kraftstoffverbrauch bedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch die Verkehrseffizienz. Die gewichtete Priorisierung dagegen optimiert lediglich die CO<sub>2</sub>-Emissionen, indem Fahrzeuge mit hohen Emissionen wie bspw. LKW möglichst nicht bremsen oder gar stoppen müssen. Dazu sind hochaktuelle individuelle Informationen per V2I zu übertragen (eCoMove, 2011).

---

<sup>4</sup> Benennung in eCoMove: ecoGreen Wave

<sup>5</sup> Benennung in eCoMove: ecoBalanced Priority

<sup>6</sup> Benennung in eCoMove: ecoStrategic Model

In KOLINE erfolgte die modellbasierte Optimierung der Versatzeit und Progressionsgeschwindigkeit ohne kooperative Daten. Diese Quelle ließe sich jedoch zukünftig im Algorithmus verarbeiten.

### 2.3 LSA-Assistenz

Die LSA-Assistenz<sup>7</sup> - als allgemeine Bezeichnung hat sich inzwischen GLOSA<sup>8</sup> etabliert - nutzt die Infrastruktur→Fahrzeug-Kommunikation (I2V). In Abhängigkeit der Umschaltzeitpunkte der nächsten Kreuzung sowie des Rückstaus wird die zulässige optimale Annäherungsgeschwindigkeit für jedes Fahrzeug bestimmt. Dies kann dezentral im Fahrzeug oder zentral erfolgen. Der Fahrer erhält die Information über ein Display. In KOLINE wurde daneben ein direkter Eingriff in die Längsregelung über die Adaptive Cruise Control (ACC) umgesetzt. Die Rückstauschätzung erfolgte in vereinfachter Form zu eCoMove (vgl. 2.2) durch Fusion einer Detektor-basierten Prädiktion mit empfangenen Fahrzeugdaten (V2I) (KOLINE, 2013). Diese Funktion soll u.a. die Anzahl an Stopps bzw. den damit verbundenen verbrauchs- und emissionsstarken Wiederanfahrten verringern sowie harmonisierte Geschwindigkeiten herbeiführen. Die Reisezeit bleibt i.A. unverändert.

## 3. Mikroskopische Verkehrssimulation der Telematikanwendungen

Für die Untersuchung wurden jeweils mehrere Szenarien definiert, welche durch ihre räumlichen, zeitlichen, regulatorischen, technologischen und Verhaltensparameter bestimmt sind. Unterschiedliche Szenarien entstehen, wenn die exogenen Parameterwerte verändert werden. In beiden Projekten wurden lediglich die technologischen Parameter verändert, indem

- den Fahrzeugflotten unterschiedliche Ausstattungsgrade mit OBUs zugewiesen wurden (KOLINE: 0; 5; 15; 25; 35%; eCoMove: 0; 10; 30; 100%),
- die LSA-Optimierung zum Einsatz kam, und
- mehrere Funktionen miteinander kombiniert wurden (KOLINE: LSA-Optimierung mit GLOSA, eCoMove: GLOSA mit Grüner Welle sowie GLOSA mit gewichteter Priorisierung).

Für die RSUs wurde eine Ausstattung von einem Stück pro Knotenpunkt festgelegt.

In KOLINE fanden insgesamt fünf Szenarien Eingang in die Nutzen-Kosten-Analyse, in eCoMove zwölf Szenarien (vgl. Tabelle 1). Die beiden Ist-Fälle stellen jeweils kein eigenständig bewertbares Szenario dar, sondern dienen zur Differenzbildung mit den Szenarien.

---

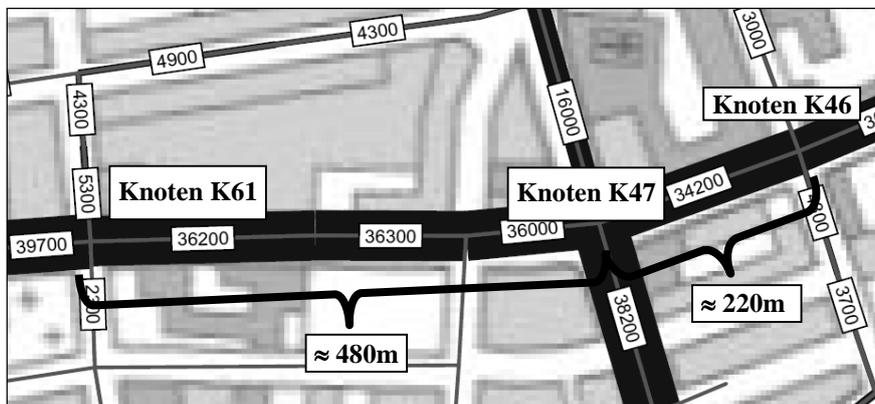
<sup>7</sup> Benennung in eCoMove: ecoApproach Advice

<sup>8</sup> Green Light Optimised Speed Advisory

**Tabelle 1: Übersicht variiertes Szenarienparameter und KOLINE-Szenariennamen T1..T5**

Funktion(en) \ Ausstattungsgrad [%]	0	5	10	15	25	30	35	100
LSA-Optimierung KOLINE + GLOSA	T1 <sup>9</sup>	T2		T3	T4		T5	
LSA-Optimierung Priorisierung eCoMove			x			x		x
GLOSA eCoMove			x			x		x
LSA-Optimierung Priorisierung + GLOSA			x			x		x
LSA-Optimierung Grüne Welle + GLOSA			x			x		x

Die räumlich-zeitlichen Parameter beschreiben in KOLINE die Straßengestaltung sowie die Verkehrsnachfrage auf einem Braunschweiger Streckenzug des nordöstlichen Innenstadtrings mit drei signalisierten Knoten (vgl. Abbildung 1) im Zeitraum zwischen 6 Uhr und 22 Uhr eines durchschnittlichen Werktages. Neben dem PKW- und Güterverkehr wurden auch die Verkehrsmodi des Umweltverbundes – ÖPNV (Busse), Radfahrer und Fußgänger – modelliert, was bisher in vielen Studien teils oder gänzlich unterblieb. In eCoMove wurde ein Streckenzug parallel zum nordöstlichen mittleren Ring in München mit vier signalisierten Knotenpunkten im Zeitraum zwischen 6 Uhr und 12 Uhr eines durchschnittlichen Werktages untersucht. Dieser weist ähnliche Verkehrsverhältnisse zu Braunschweig auf (ohne Abbildung).



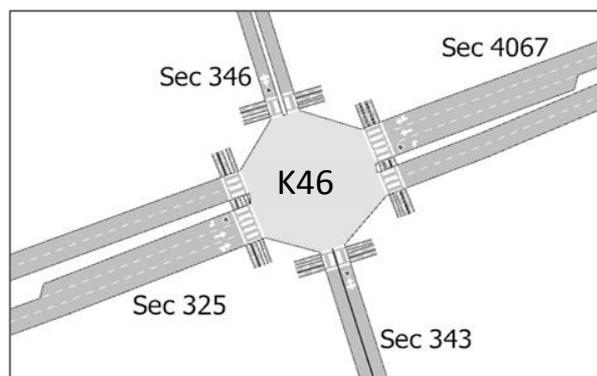
**Abbildung 1: DTV-Werte des KOLINE-Testfeldes Braunschweig (Quelle: Stadt Braunschweig, 2009)**

<sup>9</sup> in diesem Fall kommt die GLOSA nicht zum Tragen

In KOLINE wurden pro Szenario 16 Simulationsläufe mit der Software AIMSUN NG 6.1.3 durchgeführt, in eCoMove pro Szenario zehn Läufe mit der Software VISSIM 5.40. Die Indikatorwerte lagen in zeitlich aggregierten Viertelstunden- bzw. Stundenintervallen vor, wobei jeweils die arithmetischen Mittelwerte über alle Simulationsläufe gebildet wurden. Die räumliche Aggregation erstreckte sich in KOLINE auf die einzelnen Knoten, während sie in eCoMove den Gesamttraum umfasste.

#### 4. Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation für die ausgewählten Indikatoren Reisezeit und Kraftstoffverbrauch sind in den Abbildungen 3 und 4 für jede Zufahrt (Sec 325/343/346/4067) getrennt zwischen 6 und 22 Uhr am Testknotenpunkt K46 in Braunschweig (vgl. Abbildung 2) aufgetragen.



**Abbildung 2: Detaildarstellung des Nebenknotens K46**

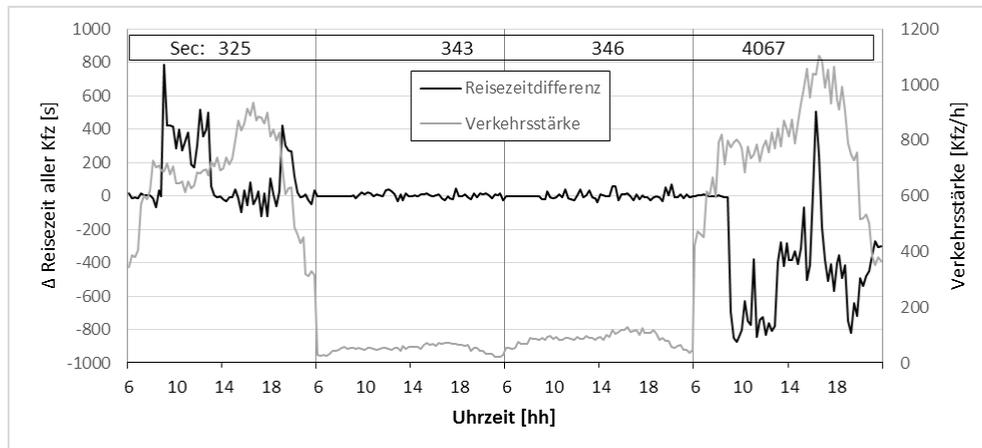


Abbildung 3: Reisezeitdifferenz und Verkehrsstärke – KOLINE T2/K46

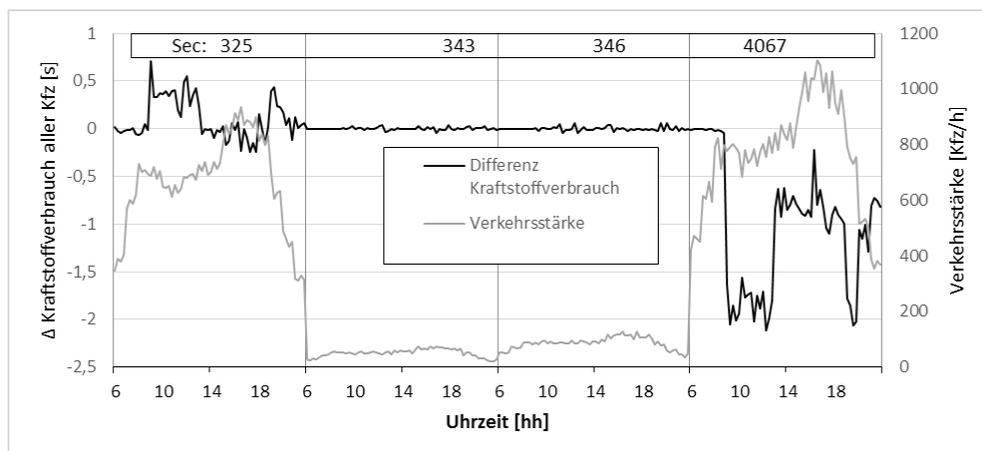


Abbildung 4: Differenz Kraftstoffverbrauch und Verkehrsstärke – KOLINE T2/K46

Aus den Abbildungen 3 und 4 wird ersichtlich, dass lediglich an der Zufahrt 4067 Reisezeit- und Kraftstoffersparnisse auftreten, während sich an den übrigen Zufahrten die Verhältnisse eher verschlechtern. Diese Effekte weisen in den beiden Hauptzufahrten 325 so-

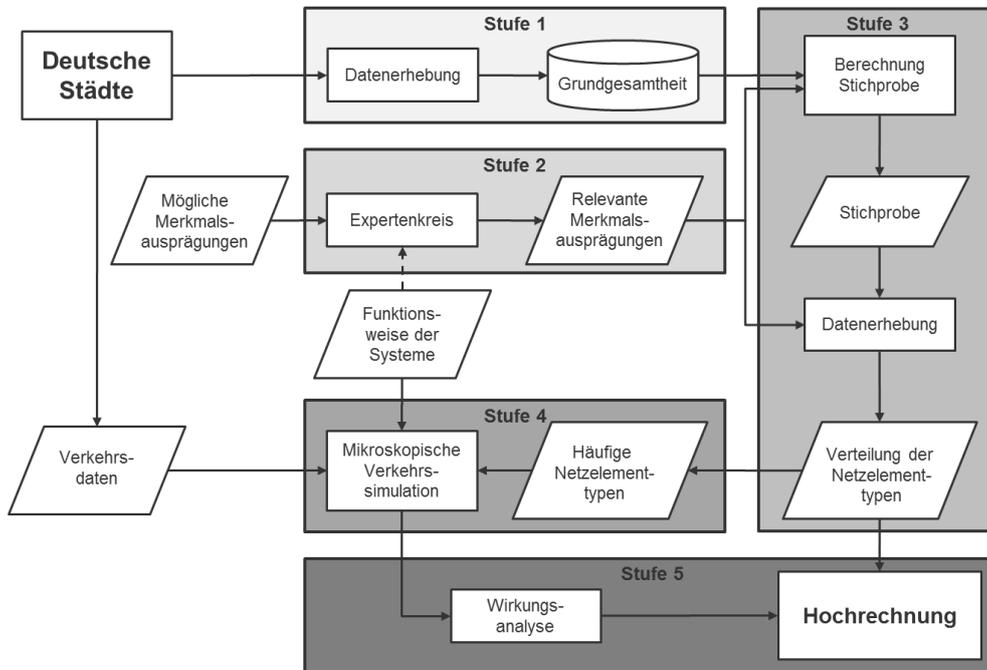
wie 4067 jeweils einen – wenn auch gegensätzlichen – Zusammenhang mit dem Tagesgang der Verkehrsstärken auf.

## 5. Hochrechnung und ökonomische Bewertung von Wirkungen kooperativer Telematikanwendungen

Im nachfolgenden Kapitel wird zunächst eine Methodik zur Hochrechnung verkehrlicher Wirkungen beschrieben. Diese wird im weiteren Verlauf des Kapitels auf die Ergebnisse des Projektes KOLINE angewandt. Abschließend erfolgt die ökonomische Bewertung der hochgerechneten Ergebnisse in Form einer Kosten-Nutzen-Analyse.

### 5.1 Methodik zur Hochrechnung verkehrlicher Wirkungen kooperativer Telematikanwendungen

Zur Hochrechnung verkehrlicher Wirkungen von kooperativer Systemen wurde im Rahmen der Forschungsinitiative UR:BAN ein generischer Ansatz entwickelt, bei dem Netzelemente nach Merkmalsausprägungen kategorisiert und zu Typen gruppiert werden (Geßenhardt, Fakler, Schendzielorz und Busch, 2014). Im Rahmen des Projektes UR:BAN bilden diese Typen der verschiedenen Netzelemente (Zufahrt, signalisierter Knotenpunkt, signalisierter Streckenzug) die Basis für die mikroskopischen Verkehrssimulationen und die anschließende Wirkungsermittlung und Hochrechnung. Abbildung verdeutlicht die Methodik noch einmal grafisch.

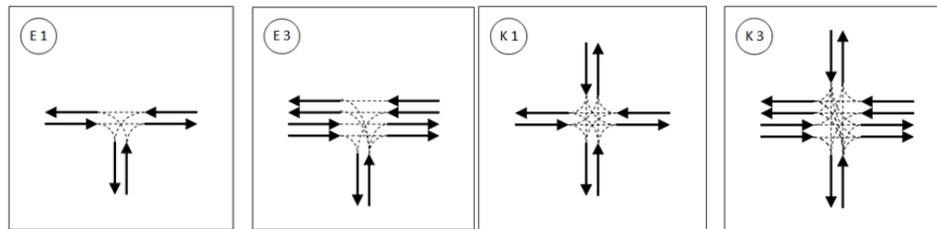


**Abbildung 5: Hochrechnungsmethodik UR:BAN**

Durch die entwickelte Methodik werden die in der mikroskopischen Verkehrssimulation ermittelten verkehrlichen Wirkungen der Telematikanwendungen auf ähnliche Bereiche derselben oder einer anderen Stadt übertragbar. Dadurch kann ein wichtiger Beitrag zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Einführung infrastrukturbasierter, kooperativer Fahrerassistenzsysteme geleistet werden.

#### 5.1.1 Bestimmung von Netzelementtypen

Je nach Fokus der Anwendung müssen relevante Merkmalsausprägungen definiert werden, die einen Einfluss auf die Wirkung der kooperativen Systeme erwarten lassen. Aus diesem Grund ist es entscheidend, in diesem Schritt die Funktionsweise und Anwendungsgebiete der Systeme zu kennen. Die letztendlich entstehenden Netzelementtypen setzen sich aus Kombinationen der vorab definierten Merkmalsausprägungen zusammen. Für Knotenpunkte wurden unter anderem die folgenden Typen gemäß Abbildung definiert, welche sich nach der Anzahl der Fahrstreifen im Zulauf zum Knotenpunkt unterscheiden.



**Abbildung 6: Beispiele für Typen des Netzelements signalisierter Knotenpunkt**

Die Telematikanwendungen, welche im Zuge des Projektes UR:BAN entwickelt wurden, sind ähnlich zu denen der Projekte eCoMove und KOLINE. Auch in UR:BAN werden Ampelphasenassistenten unterschiedlicher Ausprägung entwickelt, welche hauptsächlich auf eine Effizienzsteigerung abzielen. Aus diesem Grund können die ermittelten Typen auch für die Hochrechnung der Ergebnisse aus den Projekten eCoMove und KOLINE herangezogen werden.

#### 5.1.2 Ermittlung der Häufigkeit der Netzelementtypen

Im Rahmen des Projektes UR:BAN wurden die häufigsten Typen der Netzelemente *Zufahrt*, *signalisierter Knotenpunkt* und *signalisierter Streckenzug* ermittelt. Dieses Ergebnis basiert auf der Untersuchung einer Stichprobe aus der Grundgesamtheit der jeweiligen Netzelemente der klassifizierten Straßennetze von allen deutschen Städten mit mehr als 50.000 Einwohnern.

Zur Bestimmung der Grundgesamtheit wurden Luftbilder von Google, Microsoft (BING) und der Vermessungsämter der einzelnen Bundesländer herangezogen. Zur Ermittlung des Stichprobenumfangs kam das folgende multinominale Modell zur Anwendung (Thompson, 1987):

$$n = \frac{z_i^2 (\pi_i (1-\pi_i))}{d_i^2} \quad [\text{eq. 1}]$$

mit

$$n = \frac{z_i^2 (\pi_i (1-\pi_i))}{d_i^2} \quad [\text{eq. 2}]$$

unter der Nebenbedingung

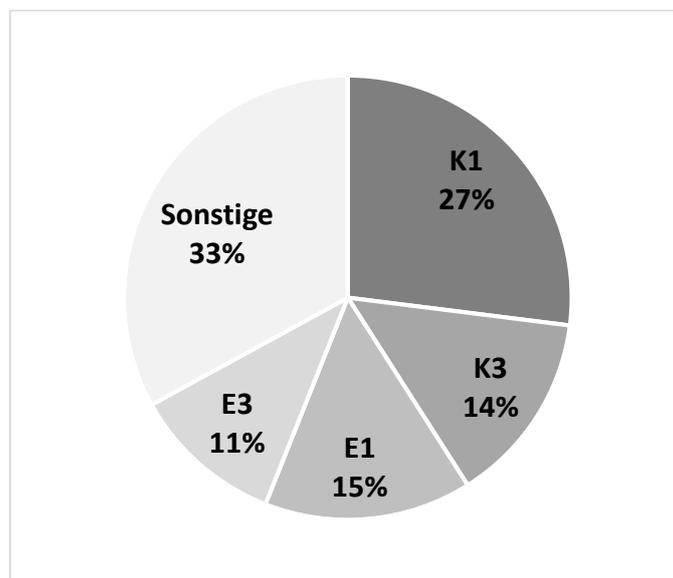
$$\sum \alpha_i \leq \alpha \quad [\text{eq. 3}]$$

$n$	Stichprobenumfang
$i$	Kategorie (Netzelementtyp)
$z_i$	Perzentil der Standardnormalverteilung der Kategorie $i$
$\pi_i$	Anteil an der Grundgesamtheit von Kategorie $i$
$d_i$	halbe Intervallbreite von Kategorie $i$

---

$\alpha$	Signifikanzniveau
$\alpha_i$	Signifikanzniveau von Kategorie $i$

Es wird ersichtlich, dass neben der Anzahl der Netzelementtypen ein vorab definiertes Signifikanzniveau  $\alpha$  und die vorab definierte Halbintervallbreite  $d_i$  den Stichprobenumfang maßgebend beeinflussen. Für das Netzelement signalisierter Knotenpunkt konnten anhand dieser Vorgehensweise bei einem Stichprobenumfang von 4.582 signalisierten Knotenpunkten (Grundgesamtheit ca. 21.600) die folgenden Häufigkeiten (vgl. Abbildung 7) ermittelt werden.



**Abbildung 7: Häufigkeit des Netzelementtyps signalisierter Knotenpunkt**

## 5.2 Hochrechnung der verkehrlichen Wirkungen am Beispiel des Projektes KOLINE

Anhand der berechneten Anteile der jeweiligen Netzelemente aus allen 187 Städten mit mehr als 50.000 Einwohnern können die ermittelten Wirkungen von Verkehrssimulationen bspw. aus KOLINE und eCoMove auf die Netzelemente, welche dem gleichen Typ zugeordnet werden können, extrapoliert werden.

Die folgende Hochrechnung wurde am Beispiel des Knotenpunkts K46 in Braunschweig durchgeführt, welcher gemäß den in vorherigen Kapiteln beschriebenen Netzelementtypen dem Knotenpunkttyp K3 zugeordnet werden kann. Die nachfolgenden Tabellen zeigen die

Hochrechnungsergebnisse der Reduktion der Reisezeit (Tabelle 2) und des Kraftstoffverbrauchs (Tabelle 3) aggregiert über die einzelnen Zufahrten des Knotenpunkts K46 in Braunschweig, welche durch die im Projekt KOLINE entwickelten Anwendungen LSA-Optimierung und LSA-Assistenz erzielt werden konnten.

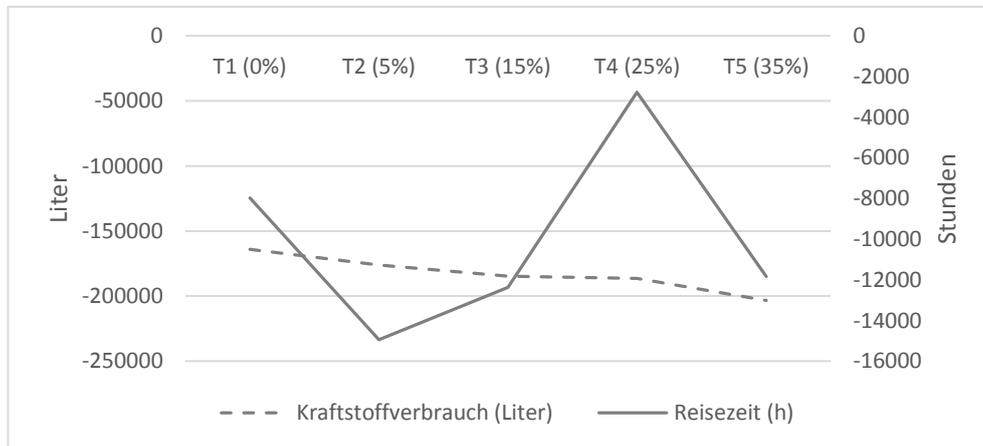
**Tabelle 2: Hochrechnung Reisezeit**

Zufahrt	Reisezeitdifferenz [min] (6-22 Uhr aggregiert)				
	T1 (0%)	T2 (5%)	T3 (15%)	T4 (25%)	T5 (35%)
325	211,49	120,99	234,99	63,94	245,65
4067	-383,66	-422,19	-487,67	-121,7	-489,04
343	6,51	3,2	5,23	1,77	5,83
346	7,41	1,62	2,06	1,04	2,81
Summe	-158,25	-296,38	-245,39	-54,95	-234,75
<b>Hochrechnung</b>	-478.548	-896.253	-742.059	-166.169	-709.884
<b>Hochrechnung [h]</b>	-7.976	-14.938	-12.368	-2.769	-11.831

**Tabelle 3: Hochrechnung Kraftstoffverbrauch**

Zufahrt	Kraftstoffverbrauch [l] (6-22 Uhr aggregiert)				
	T1 (0%)	T2 (5%)	T3 (15%)	T4 (25%)	T5 (35%)
325	7,54	6,45	7,26	6,41	3,7
4067	-61,94	-64,77	-68,29	-68,15	-70,9
343	0,1	0,1	0,07	0,13	0,08
346	0,05	-0,03	-0,09	-0,01	-0,08
Summe	-54,25	-58,25	-61,05	-61,62	-67,2
<b>Hochrechnung</b>	-164.052	-176.148	-184.615	-186.339	-203.213

Aus den Tabellen 2 und 3 ist ersichtlich, dass durch den in KOLINE entwickelten LSA-Assistenten deutschlandweit pro Normalwerktag eine Einsparung an Reisezeit bis knapp 15.000 Stunden sowie eine Einsparung an Kraftstoff von teils über 200.000 Liter erreicht werden kann. Dieser Aussage liegt die Annahme zu Grunde, dass jeder Knotenpunkt in Deutschland mit dem gleichen Knotenpunkttyp (K3) ähnliche Verhältnisse hinsichtlich der Verkehrsnachfrage, der Lichtsignalsteuerung und weiterer verkehrsbeeinflussender Bedingungen aufweist. Auffallend ist, dass mit steigendem Ausstattungsgrad eine steigende Reduktion an Kraftstoff erzielt werden kann, wohingegen kein eindeutiger Trend hinsichtlich der Reisezeiteinsparung erkennbar ist (vgl. Abbildung 8).



**Abbildung 8: Deutschlandweit normalwerttägliche Einsparung Reisezeit, Kraftstoff**

Natürlich sind diese Ergebnisse mit diversen Unsicherheiten behaftet. Trotzdem zeigen sie klar das Potential einer solchen Telematikanwendung auf. Anzumerken ist zudem, dass die im Rahmen des Projekts UR:BAN entwickelte Methode zur Hochrechnung verkehrlicher Wirkungen, bzw. mit Hilfe der ermittelten Netzelementtypen Hochrechnungen nicht nur knotenpunktfein, sondern auch zufahrtfein durchführt werden können, wodurch noch exaktere Aussagen möglich werden.

### 5.3 Ökonomische Bewertung

In den Projekten KOLINE und eCoMove wurde die Systematik des BVWP 2003 (BMVBW, 2003) mit den aktualisierten Kostensätzen aus dem Jahr 2009 (BMVBS, 2009) angewandt und im Bedarfsfall durch Bestandteile der EWS (FGSV, 1997) ergänzt. Die geschätzten Faktorkosten können der Tabelle 4 entnommen werden. Sie weichen teilweise von den in den Projektberichten (KOLINE, 2013 und eCoMove, 2014) genannten ab. Die in KOLINE für OBU veranschlagten 500€ Stückkosten sind inzwischen wesentlich gesunken.

**Tabelle 4: Übersicht der veranschlagten Faktorkosten**

Teilleistung	Nutzungszeitraum [a]	Annuitätenfaktor	Investkosten pro Stück [€]	Lfd. Kosten p.a. [€]	Σ p.a. [€]
RSU	20	0,067	10.000	400	1.072
Softwareversorgung	10	0,117	3.000	-	352
OBU	10	0,117	100	20	32

Unberücksichtigt blieben in beiden Projekten

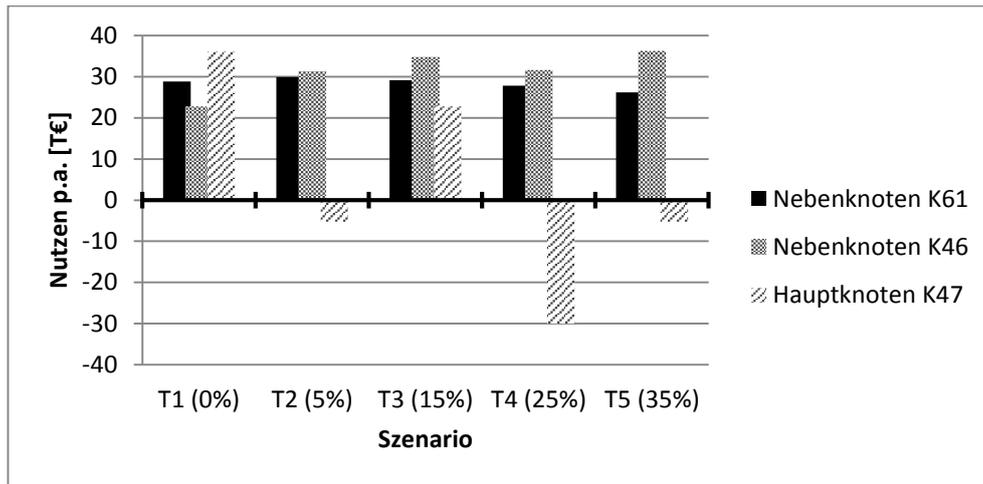
- die Betriebskosten, welche sich durch die an bestehende Anlagen hinzugefügten Telematikkomponenten nicht wesentlich verändern,
- die Flächenverfügbarkeit in bebauten Gebieten (vgl. EWS), welche sich durch reine Telematikmaßnahmen ebenfalls nicht verändert,
- der Bestandteil Betriebsgrundkosten der Nutzenkomponente Fahrzeugbetriebskosten (NB2b), da keine Änderungen der Fahrleistung in den eng umgrenzten und alternativstreckenlosen Netzen auftreten,
- die Nutzenkomponenten Verkehrssicherheit (NS) sowie Lärmimmission (NU1), da diese aufgrund fehlender mikroskopischer Ermittlungsverfahren nicht berechnet werden konnten,

sowie nur in eCoMove die Verkehrsmodi des Umweltverbundes sowie die Schadstoffimmissionen wegen fehlender Eingangsdaten. Die Schadstoffemissionen in eCoMove entstammen dem niederländischen EnViVer-Modul, welches jedoch auf mit Bayern fast identischen Fahrzeugflotten und Faktoren beruht.

Ein großes Problem stellte zunächst die zeitliche Skalierung der Simulationsergebnisse dar. Das Spektrum der während eines Jahres auftretenden Tagesverkehrsstärken – unterteilt nach Normalwerktag, Urlaubswerktag sowie Sonn- und Feiertag – als auch der 24 unterschiedlichen Stundenwerte eines Tages wird durch die wenigen simulierten Zeitscheiben nur in geringem Umfang im Mittelfeld abgedeckt (KOLINE: 37%, eCoMove: 14%). Detaillierte Analysen in KOLINE ergaben jedoch, dass die spezifischen Verlustzeiten, Kraftstoffverbräuche und damit Emissionen je Fahrzeug nahezu unabhängig von der Verkehrsmenge und damit dem Sättigungsgrad des Straßenabschnittes sind. Dies erlaubte den Ansatz der linearen Extrapolation in den Minimum- und Maximumbereich hinein. In eCoMove wurde dieser Ansatz wegen der zu kleinen Spektrumsabdeckung nicht verfolgt. Hier wurden lediglich wegen der optisch erkennbaren Analogie zwischen Vormittag und Nachmittag eines Normalwerktags die Simulationsergebnisse doppelt gezählt und auf 201 Normalwerktag p.a. hochgerechnet

In Abbildung ist zunächst der in KOLINE berechnete volkswirtschaftliche Nutzen je Szenario und Knoten abgebildet. Es fällt auf, dass der Hauptknoten K47 negative Effekte hervorrufen kann. Diese kompensieren teilweise die Nutzenverbesserungen an den Nebenknoten, welche am Nebenknoten K61 fast unverändert um die 28.000 €-Marke schwanken, während sie am K46 einen nahezu kontinuierlichen Anstieg mit fortschreitendem Ausstattungsgrad aufweisen. Der Nutzenrückgang von T3 (15%) zu T4 (25%) konnte nicht erklärt wer-

den. Für eCoMove sind nach Knotenpunkten getrennte Berechnungen wegen der aggregierten Eingangswerte nicht möglich gewesen.



**Abbildung 9: Knoten bezogener volkswirtschaftlicher Nutzen (Braunschweig)**

In Vorwegnahme einer Interpretation der negativen Effekte am Hauptknoten K47 erschien es sinnvoll, nur noch die unabhängig vom Ausstattungsgrad positiven Nutzen generierenden Nebenknoten K61 und K46 in die weiteren Berechnungen einzubeziehen. Weiterhin wurden die KOLINE-Resultate extrapoliert (u.a. Nutzenverdoppelung), um eine Vergleichbarkeit mit den auf vier Knotenpunkten beruhenden eCoMove-Ergebnissen zu ermöglichen.

In Abbildung sind die Nutzen-Kosten-Verhältnisse aller eCoMove- und KOLINE-Szenarien aufgetragen und für die beste sowie schlechteste Anwendung bzw. Kombination ausgewiesen. Der hohe NKV-Wert von 73,4 bei 0% Ausstattung (KOLINE) resultiert aus den geringen Kosten, die nur infrastrukturseitig auftreten (keine OBU), ist aus Skalierungsgründen nur angedeutet. Die Grüne Welle mit GLOSA (eCoMove) unterschreitet im Ausstattungsbereich von 100% den NKV von 1,0. Dieser stellt die Grenze dar, oberhalb derer ein Projekt volkswirtschaftlich sinnvoll ist. Ein Vergleich mit den KOLINE-Ergebnissen zeigt, dass diese in etwa denen der Grünen Welle mit GLOSA in eCoMove entsprechen. Dies ist eine gute Bestätigung, da sich der jeweilige Funktionsumfang stark ähnelt.

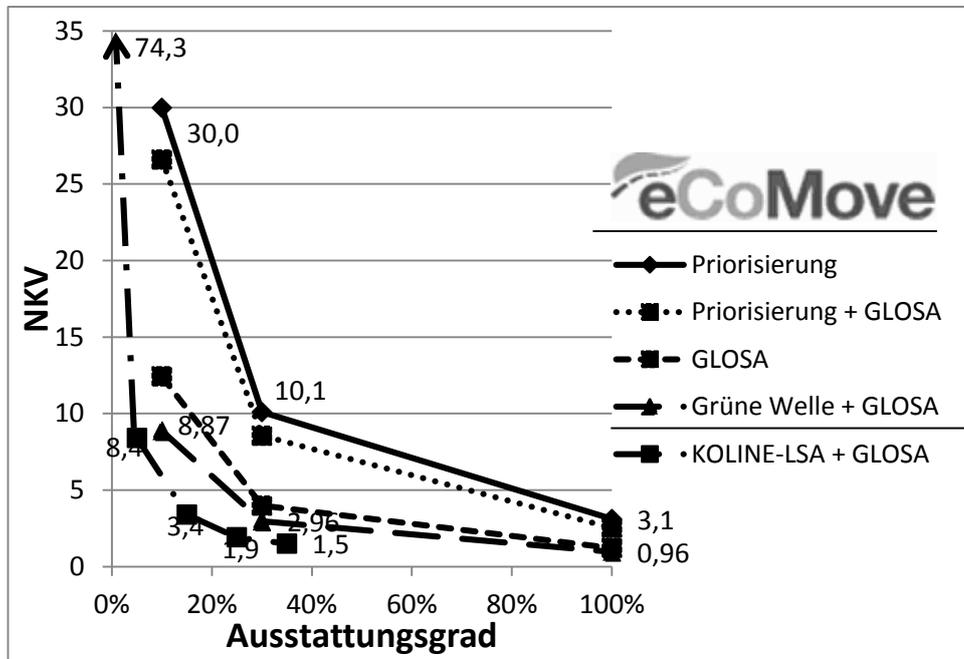


Abbildung 10: Nutzen-Kosten-Verhältnisse aller eCoMove- und KOLINE-Szenarien

## 6. Schlussfolgerungen und Diskussion

Die Untersuchungen in beiden Projekten haben gezeigt, dass mit vergleichsweise kostengünstigen Verkehrstelematiklösungen volkswirtschaftliche Vorteile erzielbar sind, wenn bestimmte Rahmenbedingungen eingehalten werden. Dazu gehört, dass manche Anwendungen offenbar nur an bestimmten Knotenpunkten zum Einsatz kommen sollten.

Ein Erklärungsansatz für die teilweise negativen Effekte der KOLINE-Funktion LSA-Assistenz ist die unterschiedliche Komplexität der Knotenpunkte und Zufahrten. So werden die verschiedenen Verkehrsströme im zentralen Knotenpunkt jeweils auf separate Richtungsfahrbahnen mit separater Signalisierung aufgeteilt. Dadurch haben die verschiedenen Fahrzeuge je nach Richtungswunsch unterschiedliche Freigabezeitpunkte und -dauern. Die bei den beiden äußeren Knotenpunkten auftretende Harmonisierung des Verkehrs ist nicht möglich. Fahrzeuge mit unterschiedlichen Richtungswünschen wählen unterschiedliche Geschwindigkeiten für die Annäherung an den Knotenpunkt. Da sich aber zunächst alle Fahrzeuge gemeinsam auf den Fahrbahnen der durchgehenden Richtungsfahrbahn bewegen, ist es möglich, dass sich Fahrzeuge gegenseitig ausbremsen oder blockieren. In der Simulation wurde versucht dieses negative Verhalten durch die Funktions-Aktivierung

ausschließlich im Nahbereich des Knotenpunkts einzugrenzen. Die gewünschte Wirkung des Systems wird so wiederum deutlich geschmälert oder ganz aufgehoben (KOLINE, 2013).

Für zukünftige Untersuchungen sind außerdem eine Reihe methodischer Probleme zu lösen, welche teilweise schon im Abschnitt 5.3 angesprochen wurden. Beispielsweise steht der notwendigen simulativen Abdeckung des Verkehrsstärkespektrums oftmals ein hoher Bearbeitungsaufwand entgegen. Die Bewertung kooperativer Systeme mit vielen nomadischen Endgeräten bedarf weiterhin einer genauen räumlichen Abgrenzung. Es sollte ebenfalls in Betracht gezogen werden, dass Kriterium „Reisezeitverlässlichkeit“ in die Betrachtungen aufzunehmen wie bspw. im neuen BVWP 2015 geschehen wird.

Weiterhin erscheint der statische Ansatz, jeweils einen konkreten Ausstattungsgrad über den Bewertungszeitraum von 20 Jahren anzunehmen, realitätsfern. Als Dynamisierung sind eher Szenarien verschiedener Ausstattungsgraden zu entwerfen, welche dann die Effekte der einzelnen Ausstattungsgrade unterschiedlich gewichtet kombinieren.

### Förderung

Das Projekt KOLINE wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im 3. Verkehrsforschungsprogramm gefördert. Das Projekt eCoMove wurde durch die Europäische Kommission im 7. Forschungsrahmenprogramm gefördert. Die Arbeiten zur NKA wurden zusammen mit TNO (NL) durchgeführt. Die Methodik zur Übertragbarkeit verkehrlicher Wirkungen entstand im Rahmen der deutschen Forschungsinitiative UR:BAN (<http://urban-online.org/de/urban.html>), ebenfalls vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im 3. Verkehrsforschungsprogramm gefördert.

### Quellen

AMITRAN (2013), *Requirements and design of the methodology, Deliverable 4.1*, April 2013, <http://www.amitran.eu/assets/Publications/Deliverables/D4-1-Requirements-and-design-of-the-methodologydraft-versionWEBSITE.pdf>.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2013), *Haushaltsgrundsätze-gesetz*, aktuelle Fassung, <http://www.gesetze-im-internet.de/hgrg/index.html>.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS (2012), *IVS-Aktionsplan 'Straße' - Koordinierte Weiterentwicklung bestehender und beschleunigte Einführung neuer Intelligenter Verkehrssysteme in Deutschland bis 2020*, Kap. 3.2, <http://www.bmvi.de/cae/servlet/contentblob/102800/publicationFile/70307/ivs-aktionsplan-strasse-broschuere.pdf>.

- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS (Auftraggeber) (2009), *Aktualisierung von Bewertungsansätzen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen in der Bundesverkehrswegeplanung*, Schlussbericht, Essen, Freiburg, München.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen BMVBW (Hrsg.), *Bundesverkehrswegeplan 2003, Grundlagen für die Zukunft der Mobilität in Deutschland*, Beschluss der Bundesregierung vom 2. Juli 2003, <http://www.bmvi.de//SharedDocs/DE/Artikel/UI/bundesverkehrswegeplan-2003-die-gesamtwirtschaftliche-bewertungsmethodik.html>.
- Car 2 Car Communication Konsortium (2012), *European vehicle manufacturers working hand in hand on deployment of cooperative Intelligent Transport Systems and Services (C-ITS)*, Pressemeldung, <http://www.car-to-car.org/index.php?id=20>.
- eCoMove Konsortium (2011), *Architecture and System Specification, Public Deliverable 5.2*, <http://ecomove-project.eu/publications/deliverables>.
- eCoMove Konsortium (2013), *ecoStrategic Model, Public Deliverable 2.10*, <http://ecomove-project.eu/publications/deliverables>.
- eCoMove Konsortium (2014), *Cost-benefit analysis, integration of evaluation results and eCoMove implementation road map, Public Deliverable 6.5*, <http://ecomove-project.eu/publications/deliverables> (nach Freigabe).
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV (1997), *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS)*, Köln, FGSV Verlag GmbH.
- Geßenhardt, J., Fakler, O., Schendzielorz, T. und Busch F. (2014), *Scaling up of ADAS' Traffic Impacts to German Cities*, 10th ITS European Congress.
- KOLINE Konsortium (2013), *Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen, Schlussbericht zum Forschungsprojekt*, <https://getinfo.de/app/download?id=TIBKAT%3a771582420>.
- Sicherere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland - simTD (2013), *Verkehrssimulation – Allgemeines*, Working Dokument W43.3, S. 9.
- Stadt Braunschweig (2009): *Verkehrsmengen im Werktagsverkehr Mo – Fr in [Kfz/24h] – Querschnittswerte, Analysefall 2007*, [http://www.braunschweig.de/leben/stadtplan\\_verkehr/verkehrsplanung/verkehrsmengen-city.pdf](http://www.braunschweig.de/leben/stadtplan_verkehr/verkehrsplanung/verkehrsmengen-city.pdf).

Thompson, S. (1987): Sample Size for Estimating Multinomial Proportions, *The American Statistician*, Vol.41, No 1, S.42-46.

Alle Internetseiten zuletzt abgerufen am 31.01.2014.