

24. Verkehrswissenschaftliche Tage 2014

- Ex-ante Kosten-Nutzen-Untersuchungen kooperativer Verkehrstelematik -

Dipl.-Ing. Wolfgang Niebel¹

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik,
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

1 Problem und Gliederung

In Deutschland sind „angemessene Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen“ für „finanzwirksame Maßnahmen“ gesetzlich vorgeschrieben (vgl. §6 Abs. 2 [1]). 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 aber auch Telematiksysteme 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 [2]. Diese nutzen die funkgestützte Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander (V2V) sowie mit der Infrastruktur (V2I) zum Datenaustausch. Die daraus gewonnenen hochaktuellen Informationen können sowohl in Fahrerinformations- und Assistenzsystemen als auch in den Verkehrssteuerungs- und -regelungsanlagen zu einer sichereren, effizienteren und umfeldfreundlicheren Verkehrsgestaltung beitragen. Nachdem die technische Machbarkeit in vielen nationalen und europäischen Projekten wiederholt demonstriert wurde, muss nun „beurteilt werden, ob eine Einführung kooperativer Systeme möglich ist und wie ein Einführungsszenario konkret ausgestaltet werden könnte“ [3].

Um aus volkswirtschaftlicher Sicht Antworten darauf zu finden, wurden in den F&E-Projekten KOLINE (Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen) sowie eCoMove (Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency) mehrere kooperative Funktionen in Zukunftsszenarien – also ex-ante – modelliert und bewertet. In Kapitel 2 sind diese Funktionalitäten zunächst aus verkehrlich-technischer Sicht skizziert. Die Untersuchungsmethodik inklusive notwendiger Verfahrensadaptionen sowie aufgetretener Probleme wird in Kapitel 3 beschrieben. Kapitel 4 stellt die erzielten Untersuchungsergebnisse dar und unterzieht sie einem Vergleich. Daraus gezogene Schlussfolgerungen sowie Ansätze für die zu führende Diskussion beinhaltet das abschließende Kapitel 5.

Das Projekt KOLINE wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im 3. Verkehrsforschungsprogramm gefördert. Projektpartner waren neben dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik das Institut für Verkehr und Stadtbauwesen sowie das Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig, das Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg (ifak), die Transver GmbH München und die Volkswagen AG.

Das Projekt eCoMove wurde durch die Europäische Kommission im 7. Forschungsrahmenprogramm gefördert. Die Arbeiten zur NKA wurden zusammen mit TNO (NL) durchgeführt.

¹ wolfgang.niebel@dlr.de, www.dlr.de/ts

2 Kooperative Telematikfunktionen

2.1 Kommunikationstechnologie

Für die Kommunikation sind fahrzeugseitig 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 dem der ehemalige Standard IEEE 802.11p aufgegangen ist. 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 (ecoGreen Wave) und priorisieren Freigaben an einzelnen Kreuzungen gemäß situativ ermittelter Gewichte (ecoBalanced Priority). Beide Funktionen stützen sich auf ein zuvor erzeugtes makro-/ mesoskopisches Verkehrszustandsmodell (ecoStrategic Model), welches u.a. auf empfangene Fahrzeugdaten (V2I) zurückgreift [4].

Für die Grünen Wellen werden Versatzzeit und Progressionsgeschwindigkeit optimiert unter der Annahme, dass der Fahrzeugpulk – auch Platoon genannt – mittels Infrastruktur→Fahrzeug-Kommunikation entsprechend beeinflusst werden kann (vgl. 2.3) [5]. Optimierungskriterien sind sowohl die CO₂-Emissionen als auch die Verkehrseffizienz. Die gewichtete Priorisierung dagegen optimiert lediglich die CO₂-Emissionen, indem Fahrzeuge mit hohen Emissionen wie bspw. LKW nicht bremsen müssen. Dazu sind hochaktuelle individuelle Informationen per V2I zu übertragen [5].

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

2.3 LSA-Assistenz

Die LSA-Assistenz nutzt die Infrastruktur→Fahrzeug-Kommunikation (I2V). In eCoMove heißt diese Funktion ecoApproach Advice, als allgemeine Bezeichnung hat sich inzwischen GLOSA (Green Light Optimised Speed Advisory) etabliert. 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 wurden daneben ein direkter Eingriff in die Längsregelung über die Adaptive Cruise Control (ACC) sowie eine längs- und quergeregelte vollautomatische Annäherung umgesetzt. Die Rückstauschätzung erfolgte in vereinfachter Form zu eCoMove (vgl. 2.1) durch Fusion einer Detektorbasierten Prädiktion mit empfangenen Fahrzeugdaten (V2I) [6].

3 Untersuchungsmethodik

3.1 Simulationsszenarien

Obwohl in beiden Projekten Feldtests durchgeführt wurden, konnten diese nur zur technischen Demonstration dienen. Denn die wenigen Testfahrzeuge (KOLINE: $n=3$) können keine verallgemeinerbaren verkehrlichen Effekte auslösen. Aus diesem Grund wurden die realen Testfelder in mikroskopischen Verkehrssimulationsmodellen nachgebildet, welche u.a. mit den Feldtestdaten kalibriert wurden. Der aufwändig zu modellierende mikroskopische Ansatz ist notwendig, da die Telematikeffekte auf Einzelfahrzeugbasis und durch Fahrzeuginteraktionen zustande kommen und nicht durch makroskopische Modelle abzudecken sind. Die anschließende Modellvalidierung fand mit erhobenen Datensätzen des jeweiligen aktuellen Ist-Zustands, also des Ohne-Falls, statt. In KOLINE wurden pro Szenario 16 Simulationsläufe mit der Software AIMSUN NG 6.1.3 durchgeführt, in eCoMove pro Szenario 10 Läufe mit der Software VISSIM 5.40. Die Indikatorenwerte lagen für die anschließende NKA 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.

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 Art der Rückstauschätzung variiert wurde (KOLINE: Datenfusion vs. Prädiktion ohne kooperative Daten),
- 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 1 Stück pro Knotenpunkt festgelegt.

In KOLINE fanden insgesamt sieben Szenarien Eingang in die Nutzen-Kosten-Analyse, in eCoMove

13	Szenarien	(vgl.
----	-----------	-------

Tabelle 1). Dabei stellen die beiden Ohne-Fälle jeweils kein eigenständig zu bewertendes Szenario dar, sondern dienen zur Differenzbildung mit den anderen Szenarien.

Tabelle 1: Übersicht variiertes Szenarienparameter und KOLINE-Szenariennamen

Ausstattungsgrad [%]	0	5	10	15	25	30	35	100
Funktion(en)								
Ist-Zustand (KOLINE, eCoMove)	2x							
LSA-Optimierung KOLINE + GLOSA	T1*	T2		T3	T4		T5	
↳ Rückstau ohne Datenfusion							T6	
LSA-Optimierung Priorisierung			x			x		x
GLOSA			x			x		x
LSA-Optimierung Priorisierung + GLOSA			x			x		x
LSA-Optimierung Grüne Welle + GLOSA			x			x		x

*in diesem Fall kommt die GLOSA nicht zum Tragen

Die räumlich-zeitlichen Parameter beschreiben in KOLINE die Straßengestaltung sowie 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 (vgl. Abbildung 2). Dieser weist ähnliche Verkehrsverhältnisse zu Braunschweig auf.

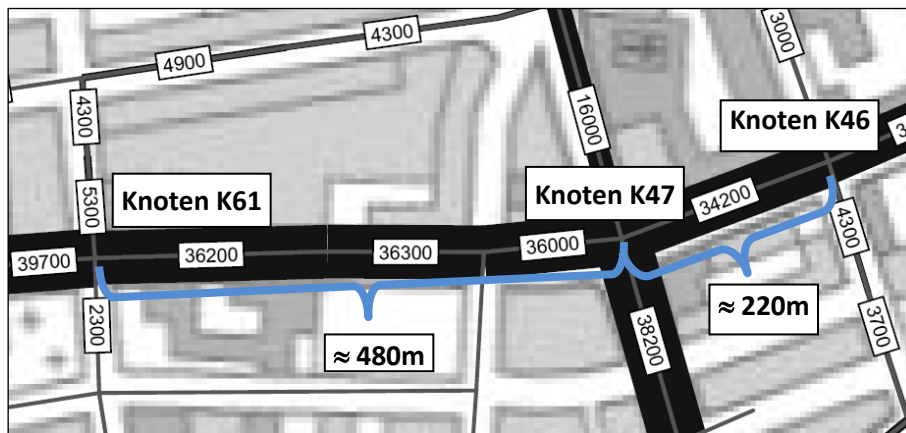


Abbildung 1: DTV-Werte und räumliche Anordnung des KOLINE-Testfeldes Braunschweig [7]

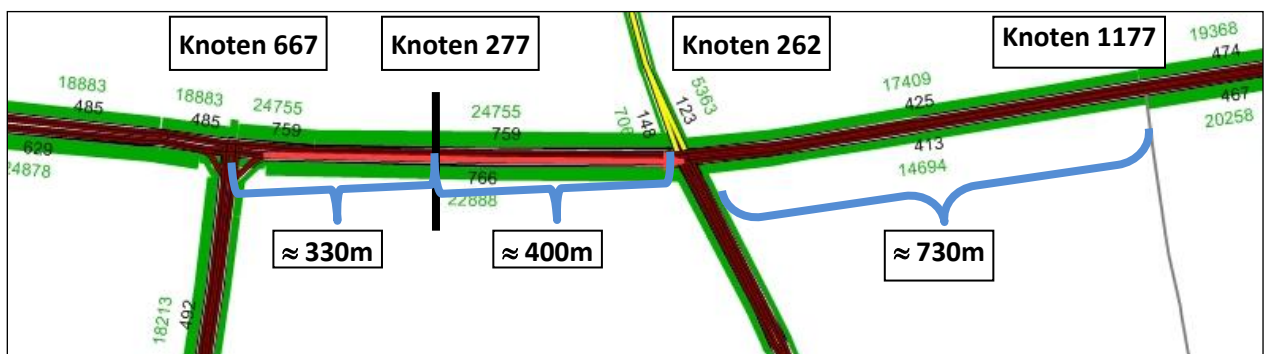


Abbildung 2: DTV-Werte und räumliche Anordnung des eCoMove-Testfeldes München [8]

3.2 Bewertungsverfahren

In beiden Projekten wurde die Systematik des BVWP 2003 [9] mit den aktualisierten Kostensätzen aus dem Jahr 2009 [10] angewandt und im Bedarfsfall durch Bestandteil der EWS [11] ergänzt. Die geschätzten Kosten können der Tabelle 2 entnommen werden. Sie weichen teilweise von den in den Projektberichten [6], [12] genannten ab. Die in KOLINE für OBUs veranschlagten 500€ Stückkosten sind inzwischen wesentlich gesunken.

Tabelle 2: Übersicht der veranschlagten Kosten

Teilleistung	Abschreibungszeitraum [a]	Annuitätenfaktor	Investkosten pro Stück [€]	Lfd. Kosten p.a. [€]	Σ p.a. [€]
RSU	20	0,067	10.000	400	1.072,16
Softwareversorgung	10	0,117	3.000	-	351,69
OBU	10	0,117	100	20	31,72

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 we-

gen der optisch erkennbaren Analogie zwischen Vormittag und Nachmittag eines Normalwerktags die Simulationsergebnisse doppelt gezählt und auf 201 Normalwerktag p.a. hochgerechnet.

4 Bewertungsergebnisse

In Abbildung 3 ist zunächst der in KOLINE berechnete volkswirtschaftliche Nutzen je Szenario und Knoten abgebildet. Es fällt auf, dass der Hauptknoten (rot) negative Effekte hervorrufen kann. Diese kompensieren teilweise die Nutzenverbesserungen an den Nebenknoten, welche am Nebenknoten K61 (grün) fast unverändert um die 28.000 €-Marke schwanken, während sie am K46 (lila) einen nahezu kontinuierlichen Anstieg mit fortschreitender Ausstattungsrate aufweisen. Der Nutzenrückgang von T3 (15%) zu T4 (25%) konnte nicht erklärt werden. Ebenfalls auffällig ist, dass das Szenario T6 ohne fusionierte Rückstauschätzung besser abschneidet als T5 mit Datenfusion bei demselben Ausstattungsgrad von 35 %. Für eCoMove sind nach Knotenpunkten getrennte Berechnungen wegen der aggregierten Eingangswerte nicht möglich gewesen.

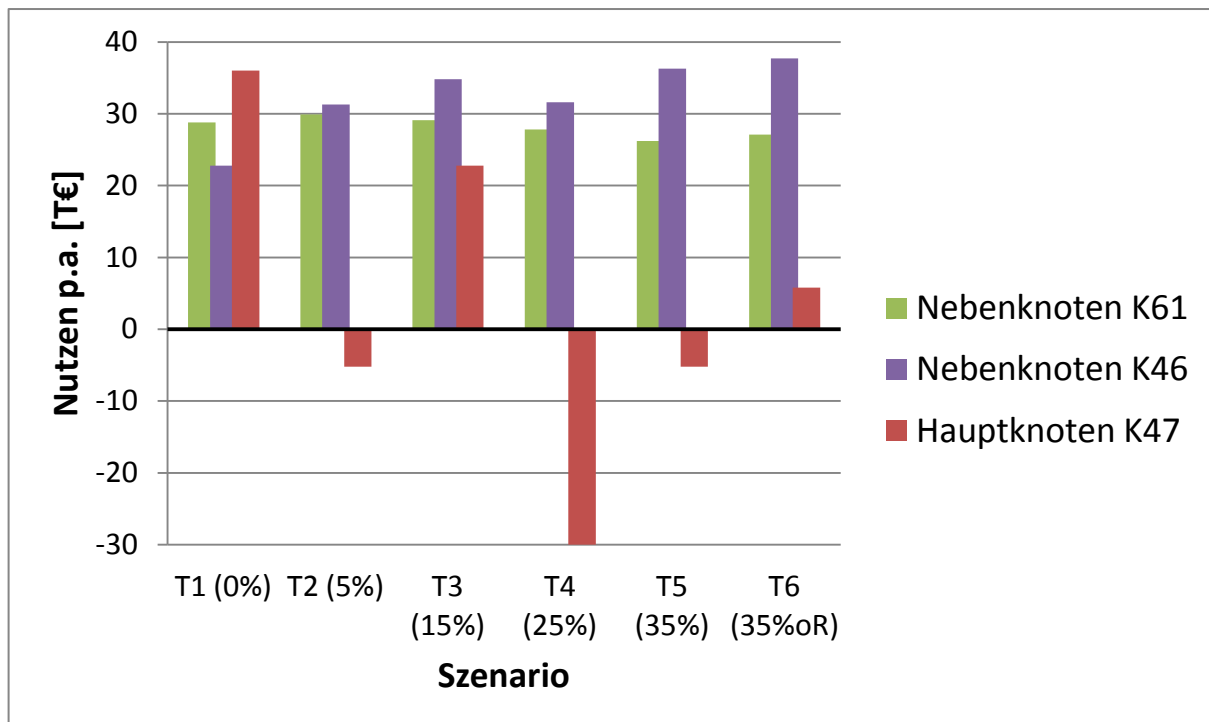


Abbildung 3: Knoten bezogener volkswirtschaftlicher Nutzen (Braunschweig)

In Vorwegnahme einer Interpretation der negativen Effekte am Hauptknoten K47 erschien es sinnvoll, nur noch die unabhängig von der Ausstattungsrate 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. Die Nutzen-Kosten-Verhältnisse (NKV) aller KOLINE-Szenarien sind in Tabelle 3 aufgeführt. Der hohe Wert für 0% Ausstattung resultiert aus den geringen Kosten, die nur infrastrukturseitig auftreten (keine OBUs).

Tabelle 3: Nutzen-Kosten-Verhältnisse aller KOLINE-Szenarien

Ausstattungsgrad [%]	0	5	15	25	35
Nutzen-Kosten-Verhältnis	73,4	8,4	3,4	1,9	1,5

In Abbildung 4 sind die Nutzen-Kosten-Verhältnisse aller eCoMove-Szenarien aufgetragen und für die beste sowie schlechteste Funktion bzw. Kombination ausgewiesen. Die Grüne Welle mit GLOSA 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.

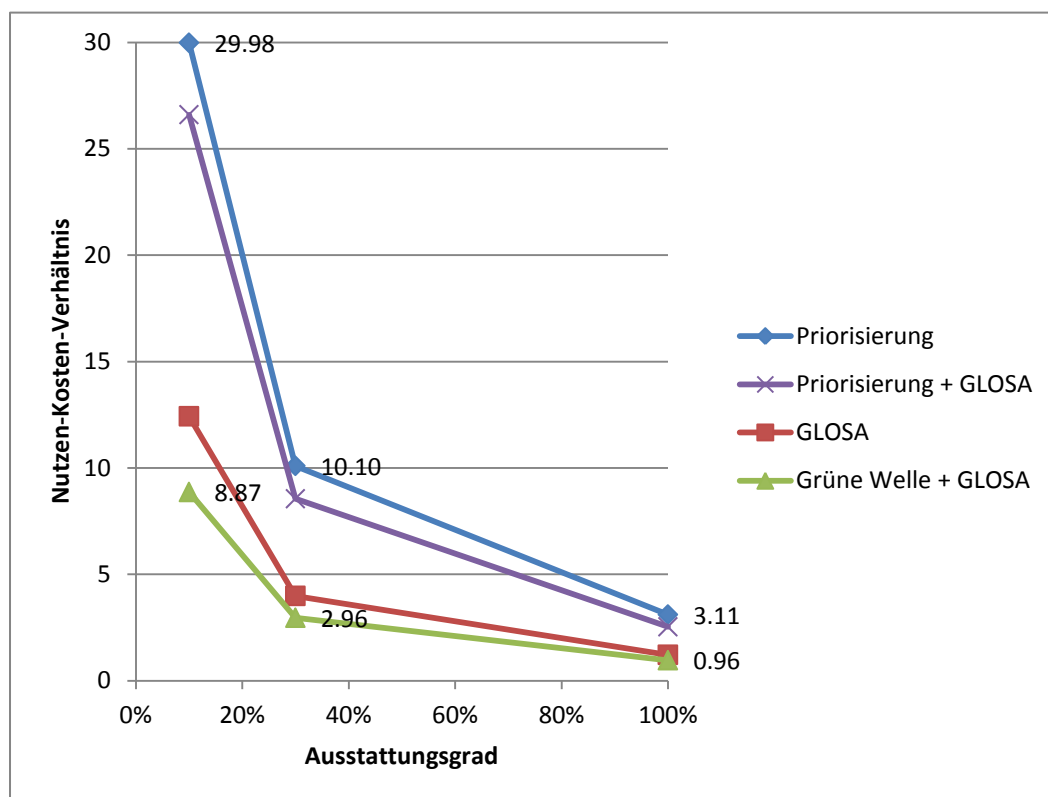


Abbildung 4: Nutzen-Kosten-Verhältnisse aller eCoMove-Szenarien

5 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 Funktionen 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. So werden die verschiedenen Verkehrsströme im zentralen Knotenpunkt jeweils auf separate Richtungsfahrstreifen mit separater Signalisierung aufgeteilt. Dadurch haben die verschiedenen Fahrzeuge je nach Richtungswunsch unterschiedliche Freigabezeitpunkte und -dauern. Die bei den beiden ä-

Bei 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 Fahrstreifen 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 geschwächt oder ganz aufgehoben [6].

Für zukünftige Untersuchungen sind außerdem eine Reihe methodischer Probleme zu lösen, welche teilweise schon im Abschnitt 3.2 angesprochen wurden. Beispielsweise steht der notwendigen Abdeckung zumindest eines Großteils des Verkehrsstärkespektrums oftmals ein hoher Bearbeitungsaufwand entgegen. Außerdem werden meist reale Verkehrsnetze mit spezifischen Eigenheiten in der Simulation abgebildet und kalibriert, wodurch die Ergebnisse kaum auf räumlich größere Netze übertragbar sind. Die Bewertung kooperativer Systeme mit vielen nomadischen Endgeräten bedarf aber genau dieser Generalisierbarkeit, da die Nutzengenerierung eben in diesen räumlich großen Netzen verteilt stattfindet.

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.

6 Literatur

- [1] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2013): Haushaltsgrundsätzegesetz, aktuelle Fassung, <http://www.gesetze-im-internet.de/hgrg/index.html>.
- [2] 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>.
- [3] 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>.
- [4] eCoMove Konsortium (2013): ecoStrategic Model, Public Deliverable 2.10, <http://ecomove-project.eu/publications/deliverables>.
- [5] eCoMove Konsortium (2011): Architecture and System Specification, Public Deliverable 5.2, <http://ecomove-project.eu/publications/deliverables>.
- [6] KOLINE Konsortium (2013): Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen, Schlussbericht zum Forschungsprojekt, <https://getinfo.de/app/download?id=TIBKAT%3a771582420>.

- [7] 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
- [8] PTV Group (o.J.): Validate Verkehrsmodell Deutschland, Umlegungsergebnis Basisnetz (eigene Berechnung).
- [9] 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>.
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS (Auftraggeber) (2009): Aktualisierung von Bewertungsansätzen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen in der Bundesverkehrswegeplanung, Schlussbericht. Essen, Freiburg, München.
- [11] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS), Köln, FGSV Verlag GmbH.
- [12] 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).

Alle Internetseiten zuletzt abgerufen am 31.01.2014.