

Organic Traffic Control mit Dynamic Route Guidance als Maßnahme zur Reduzierung von Abgasemissionen im Vergleich

Christian Frank
Universität Passau
Passau, Deutschland
frank50@gw.uni-passau.de

Abstract—In dieser Arbeit wird ein Organic Traffic Control System mit Dynamic Route Guidance Funktionalität hinsichtlich seiner emissionsreduzierenden Wirkung im Verkehr betrachtet. Dieses System wird mit anderen Umweltmaßnahmen, namentlich Umweltzonen, Fahrverboten und Hardwarenausrüstungen, hinsichtlich Wirkung und weiterer Kriterien verglichen. Es werden hierzu Daten und Ergebnisse aus der bestehenden Literatur verwendet und einige wenige Rechnungen durchgeführt. Die Datenlage erlaubt nur teilweise quantitative Vergleiche. Qualitativ zeigt sich, dass das System Potential bietet, effektiv innerhalb seines Installationsbereichs Emissionen zu senken. Es reduziert die Menge aller Abgase und zusätzlich den Spritverbrauch, ohne dass dabei Nachteile für bestimmte Verkehrsteilnehmer entstehen. Dies ist bei den Vergleichsmaßnahmen jeweils nicht der Fall.

Index Terms—Organic Traffic Control, Dynamic Route Guidance, Umweltzone, Fahrverbote, Nachrüstung, Vergleich, Emission, Abgase, Umwelt

I. EINLEITUNG

Mit der stetig wachsenden Zahl an motorisierten Verkehrsteilnehmern verstärken sich unter anderem die negativen Auswirkungen von hohem Verkehrsaufkommen. Speziell in Großstädten ist die Überlastung des Straßennetzes und der damit verbundene Anstieg des Abgasausstoßes von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ein ernstes Problem; Stickoxidgrenzwerte werden in vielen deutschen Städten so häufig überschritten, dass Fahrverbote diskutiert und installiert werden.

Gegenstand aktueller Forschung [2] sind sogenannte Organic Traffic Control Systeme, hier verbunden mit Dynamic Route Guidance. Die aus diesen Systemen indirekt resultierende Einsparung von Abgasemissionen soll im Folgenden mit der Wirkung anderer Umweltmaßnahmen verglichen werden. Dabei werden zunächst in Abschnitt II die zugrunde liegenden Begriffe Organic Computing, Organic Traffic Control und Dynamic Route Guidance erläutert. In Abschnitt III wird auf die relevante Literatur eingegangen. In Abschnitt IV werden die Maßnahmen vorgestellt, um diese dann in Abschnitt V zu vergleichen und ein Fazit zu ziehen. Im Schlussabschnitt VI wird ein Ausblick auf zukünftige Forschung gegeben.

II. ORGANIC TRAFFIC CONTROL UND DYNAMIC ROUTE GUIDANCE

Tomforde et al. definieren ein Organic Computing (OC) System als ein intelligentes IT-System, das mit Sensoren und Aktuatoren ausgestattet ist, um seinen Zustand den aktuellen Bedingungen zu jeder Zeit automatisch, dynamisch und robust anpassen zu können [1]. Dafür erfüllen solche Systeme einige sogenannte Selbst-X-Eigenschaften, wie etwa selbst konfigurierend, selbst optimierend, selbst heilend und selbst schützend. Die Selbstoptimierung ist eine Kernfunktion von Organic Computing Systemen, d.h. die Zustandsanpassungen werden mit der Zeit automatisch verbessert.

Organic Traffic Control (OTC) Systeme sind Organic Computing Systeme, die im Straßenverkehr für intelligente Ampelsteuerungen eingesetzt werden sollen [2]. Sie messen den Verkehrsfluss an und zwischen Kreuzungen, um anschließend die gemessenen Standzeiten pro Fahrzeug zu minimieren bzw. einen optimalen Verkehrsfluss zu erzeugen. Für eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus bzw. der Funktionsweise eines solchen Systems wird auf [2] verwiesen.

Zusätzlich ist das hier betrachtete System mit Dynamic Route Guidance (DRG) ausgestattet [3]. Prothmann et al. verwenden u.a. eine Variante des aus dem Internetbereich bekannten Distance Vector Algorithmus (DVR), um die optimalen Pfade zu ausgewählten Lokationen zu berechnen. Damit diese den Fahrzeugführern übermittelt werden können, werden an jeder Kreuzung etwa elektronische Anzeigetafeln (Variable Message Signs, VMS) installiert, die jeweils den nächsten Schritt (d.h. in welche Richtung gefahren werden muss) anzeigen.

Ein solches System mit Dynamic Route Guidance kann schnell auf Probleme im Straßennetz, z.B. einen Unfall, reagieren und die Routen neu berechnen [3]. Sie sind also robust gegenüber Störungen.

Die Effektivität dieses Systems hängt unter anderem davon ab, welcher Anteil der Autofahrer sich an den Routenempfehlungen orientiert. Grundsätzlich ist aber ein verbesserter Verkehrsfluss zu beobachten [3]. In Szenarien mit Straßenblockaden wird diese Verbesserung besonders deutlich.

III. DIE LITERATUR

Dynamic Route Guidance selbst ist ein schon seit über 20 Jahren bestehendes Forschungsthema, siehe zum Beispiel [14]. Die Auswirkungen auf die Umwelt eines solchen Systems sind hingegen noch sehr wenig erforscht. Neben der Arbeit von Prothmann et al. [3], deren Ergebnisse in diesem Paper verwendet werden, gibt es beispielsweise noch [15]. Ein Vergleich mit andern Umweltmaßnahmen wurde bisher nicht durchgeführt. Prothmann et al. [3] verwenden den Simulator AIMSUN, um den Verkehrsfluss zu simulieren. Für die Simulation der Emissionen verwenden sie die Umweltmodelle von AIMSUN.

Auch die unten angeführten Umweltmaßnahmen der Fahrverbote und Hardwareausrüstungen sind erst spärlich erforscht, da diese erst seit kurzem diskutiert werden. Häufig sind Angaben von Experten zu diesen Themen zunächst nur Schätzungen. Lediglich der ADAC bietet hier in [12] Forschungsergebnisse. Der ADAC stützt sich hier auf eigens durchgeführte Tests, in denen verschiedene Lösungen zur Nachrüstung an verschiedenen Fahrzeugen unter anderem im realen Straßenverkehr getestet wurden.

Etwas mehr Daten gibt es zu den Umweltzonen, da diese bereits länger bestehen. Auch hierzu liefert der ADAC Ergebnisse [16]. Diese Arbeit wird sich jedoch vorrangig an W. Jiang et al. [4] orientieren. Dort wurden Messergebnisse offizieller Messstationen verwendet, die in drei Gruppen (innerhalb Umweltzonen, außerhalb Umweltzonen, städtischer Hintergrund) eingeteilt wurden. Mit Messungen aus dem Zeitraum von 2002 bis 2012 wurde errechnet, welcher Anteil der Veränderungen der Feinstaubkonzentration auf die Umweltzonen zurückzuführen ist.

Organic Traffic Control ist ein relativ junges Thema. Ergebnisse kommen vorrangig von Holger Prothmann, der zu diesem Thema eine Dissertation verfasst hat [17], sowie Christian Müller-Schloer und Sven Tomforde. Zur Simulation des Verkehrs und der Ampelsteuerung wird hier oft der Simulator AIMSUN verwendet [2] [3].

IV. DIE MASSNAHMEN

A. Organic Traffic Control mit Dynamic Route Guidance

TABELLE I
PROZENTUALE VERÄNDERUNGEN (EMISSIONSEINSPARUNG), NORMALES SZENARIO

	Akzeptanzquote VMS		
	12,5%	37,5%	75%
Kraftstoff	-1,5%	2,8%	4,6%
CO	3,3%	11,0%	12,8%
HC	3,8%	12,1%	13,9%
NO _x	4,3%	13,0%	15,2%

1) *Wirkung:* Ein positiver Nebeneffekt des mit DRG verbesserten Verkehrsflusses und der dadurch verkürzten Standzeiten ist ein geringerer Abgasausstoß pro Fahrzeug [3]. Die Ergebnisse von Prothmann et al. mit dem Distance Vector Algorithmus sind in Tabelle I und Tabelle II abgebildet. Es

TABELLE II
PROZENTUALE VERÄNDERUNGEN (EMISSIONSEINSPARUNG), UNFALLSZENARIO

	Akzeptanzquote VMS		
	12,5%	37,5%	75%
Kraftstoff	-4,3%	5,1%	8,3%
CO	0,6%	16,9%	20,2%
HC	1,4%	18,5%	22,2%
NO _x	0,9%	19,3%	22,9%

werden die prozentualen Einsparungen des Spritverbrauchs und ausgewählter Abgasemissionen gegenüber Szenarien ohne einem OTC-System mit DRG aufgelistet. Lediglich bei einer geringen Akzeptanzquote der Routenempfehlungen wurde ein leicht erhöhter Spritverbrauch beobachtet. Ansonsten sind eindeutige Verbesserungen zu erkennen. Prothmann et al. zeigen, dass die Verwendung des Link State Algorithmus anstelle von DVR ähnliche, aber schwächere Veränderungen bringt.

2) *Kosten:* Zu den potentiellen Kosten, um ein DRG System real zu installieren, gibt es bisher keine Daten.

B. Umweltzonen

Umweltzonen wurden ca. ab dem Jahr 2008 in deutschen Städten eingerichtet [4]. Ihr Zweck war, die Menge an Feinstaub in Bereichen, in denen besonders hohe Konzentrationen gemessen wurden, zu senken. Hierzu wurden diese Bereiche mit Schildern gekennzeichnet, die die Einfahrt für Fahrzeuge verbieten, deren Partikelemissionen einen bestimmten Grenzwert überschreiten. Um die Einhaltung der Einfahrtsverbote im Straßenverkehr kontrollieren zu können, wurden bzw. werden die Fahrzeuge mit verschiedenfarbigen Plaketten (rot, gelb, grün) nach ihren Partikelemissionen gekennzeichnet. Die grüne Umweltplakette kennzeichnet hierbei die geringsten Emissionen.

Von den Beschränkungen durch Umweltzonen sind vorrangig Dieselfahrzeuge betroffen, da diese technisch bedingt in der Regel mehr Rußpartikel emittieren als vergleichbare Fahrzeuge mit Benzinmotor. Es gibt Ausnahmeregelungen beispielsweise für Fahrzeuge von Anwohnern und des Lieferverkehrs, die ohne entsprechende Plakette in die Zonen einfahren dürfen.

1) *Wirkung:* Es ist etwa eine Reduktion von $1,4\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM₁₀ (Partikel mit Durchmesser kleiner als $10\mu\text{m}$) zwischen 2008 und 2012 auf die Einführung von Umweltzonen zurückzuführen [4]. Die durchschnittliche Konzentration lag vor der Einführung laut Jiang et al. bei $35,26\mu\text{g}/\text{m}^3$. Relativ ergibt sich somit eine Reduktion um etwa 3,97%. Zur Veränderung von PM_{2,5}-Konzentrationen können die Autoren keine quantitative Aussage machen.

Die Veränderung der NO_x-Konzentrationen ist geringer und wesentlich schwieriger zu interpretieren [16] [4]. In den Umweltzonen betrug nach [4] die Reduzierung 6,9%, in den Vergleichszonen ohne besondere Maßnahmen 8,6%.

Diese Studie legt also keinen positiven Effekt nahe. Weitere Emissionen wurden nicht untersucht.

Laut dem ADAC haben bereits 89% der zugelassenen Fahrzeuge die grüne Umweltplakette und damit Zugang zu sämtlichen auf Feinstaub bezogenen Umweltzonen [4]. Ein erheblicher Teil der übrigen Fahrzeuge erfüllt dem ADAC zufolge Ausnahmeregelungen. Die Effekte der Umweltzonen nähern sich daher ihrem Maximum.

2) *Kosten und negative Auswirkungen:* Die Umweltzonen haben bis Anfang 2009 bereits Kosten und Schäden von etwa 12,1 Mrd. € verursacht [5]. Verkehrswissenschaftler Ferdinand Dudenhöffer zufolge beträgt dabei der Wertverlust pro Fahrzeug, das die grüne Plakette nicht erhält, schätzungsweise zwischen 1000 und 2000 Euro.

Laut dem Kraftfahrtbundesamt waren 2009 49,6 Millionen Kraftfahrzeuge zugelassen [6], davon waren bis zu acht Millionen Fahrzeuge (ca. 16,1%) von Fahrverboten durch die Umweltzonen betroffen [7].

C. Fahrverbote

In Deutschland werden aktuell Fahrverbote aufgrund von überschrittenen Stickoxid-Grenzwerten (NO_x) diskutiert [19]. Ähnlich dem Prinzip der bereits existierenden Umweltzonen sollen hierbei auf besonders belasteten Streckenabschnitten Fahrzeuge mit hohem NO_x -Ausstoß ausgeschlossen werden. Wieder sind hauptsächlich Diesel-Fahrzeuge betroffen, da bei diesen aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen im Motor vermehrt Stickoxide entstehen.

1) *Wirkung:* Zu diesen diskutierten und teilweise beschlossenen Fahrverboten liegen noch nicht ausreichend viele Daten vor, um konkrete Wirkungen zu beziffern. Unter der Betrachtung der Tatsache, dass bisher beschlossene Fahrverbote nur auf einzelnen Straßen gelten und Verstöße gegen diese nur bedingt erkannt werden können, lässt sich zusammen mit der Einschätzung von Wissenschaftlern [8] eine ähnliche bis geringere Wirkung auf die Stickoxidkonzentrationen vermuten, verglichen mit der Wirkung von Umweltzonen auf die Feinstaubkonzentration. Verbesserungen über äußerst kurze Zeiträume konnten nicht festgestellt werden [9].

2) *Kosten und negative Auswirkungen:* Nach Schätzungen von Ferdinand Dudenhöffer liegen die Kosten der Fahrverbote bei etwa 15 Milliarden Euro [18], womit sie sich in derselben Größenordnung wie die Umweltzonen bewegen würden.

Im Jahr 2018 waren 56,5 Millionen Kraftfahrzeuge zugelassen, davon 46,5 Millionen PKW [10]. Der Anteil der PKW mit Abgasnorm Euro-6 betrug laut dem KBA 20,0%, mit Euro-5 28,2% und mit Euro-4 30,8%. Nimmt man an, dass sich die Anteile von Benzin- und Diesel-Fahrzeugen mit 65,5% bzw. 32,8% gleichermaßen auf die Abgasnormen verteilen, erhält man, dass Diesel-PKW mit Euro-4 und schlechter 7,9 Millionen Fahrzeuge (17,0%), mit Euro-5 und schlechter 12,2 Millionen Fahrzeuge (26,2%) des Fahrzeugbestandes

ausmachen. Mit den Euro-6 Dieseln erhöht sich dieser Wert auf 15,3 Millionen Fahrzeuge.

Abhängig von den konkreten Fahrverboten wären somit bis zu 7,9 Millionen, 12,2 Millionen oder 15,3 Millionen Diesel-PKW von den Fahrverboten betroffen. Pläne zu Fahrverboten enthalten teilweise auch Benziner bis Euro-2 [11]. Der Anteil dieser PKW am Gesamtbestand ist mit den Zahlen des KBA nicht ermittelbar. Wie viele PKW von Ausnahmegenehmigungen betroffen wären, ist nicht zu ermitteln.

D. Nachrüstungen

Um die oben genannten Fahrverbote zu vermeiden, werden auf politischer Ebene Hardwarenachrüstungen für Dieselfahrzeuge mit Abgasnorm Euro-5, teilweise auch mit Euro-4, diskutiert [20]. Dies würde eine permanente Einsparung von Stickoxidemissionen bei umgerüsteten Fahrzeugen bedeuten, im Gegensatz zu einer Verlagerung der Emissionen bei streckenweisen Fahrverboten.

1) *Wirkung:* Das Potential zur Reduzierung der Stickoxidemissionen des gesamten Verkehrs durch die Nachrüstung von Euro-5 Dieseln bewegt sich zwischen 5,6% und 31,5% [12]. Nimmt man eine Umrüstquote von 100% und eine NO_x -Einsparung von 70% bei umgerüsteten Fahrzeugen an, liegt die geschätzte Emissionsreduzierung laut ADAC bei 25% in stark belasteten Gebiete.

Andere Schadstoffe sind der Studie zufolge kaum betroffen. Es wird tendenziell weniger CO ausgestoßen, wegen einem in der Regel leicht erhöhten Kraftstoffverbrauch aber etwas mehr CO_2 . Bei HC sind keine konsistenten Änderungen zu beobachten.

2) *Kosten:* Nach den oben genannten Zahlen und Anteilen waren 2018 etwa 4,3 Millionen Diesel-PKW mit der Schadstoffklasse Euro-5 zugelassen. Die Nachrüstkosten pro Fahrzeug bewegen sich zwischen 1400€ und 3300€ [12]. Da sich der tatsächliche Preis nach Einschätzung von ADAC-Experten im oberen Drittel der Preisspanne bewegen wird, nehmen wir für eine Schätzung an, dass die Kosten für den Endkunden 3000€ betragen. Bei einer Umrüstquote von 100% aller Euro-5 Diesel-PKW in Deutschland ergeben sich Gesamtkosten von 12,9 Milliarden Euro.

Die Übernahme der Kosten durch den Staat oder die Fahrzeughersteller ist Bestandteil aktueller öffentlicher Diskussionen. Es kann somit nicht gesagt werden, wer die Kosten im Falle verordneter Nachrüstungen tragen würde.

V. VERGLEICH DER MASSNAHMEN

Im Folgenden werden die genannten Methoden (Umweltzonen, Fahrverbote, Nachrüstungen) Organic Traffic Control mit Dynamic Route Guidance (DRG) gegenübergestellt.

A. Emissionsreduzierung

Umweltzonen und Fahrverbote lassen sich mit DRG aufgrund mangelnder Daten nicht direkt vergleichen. Es ist lediglich zu bemerken, dass die Verbesserung der Partikelemissionen um 3,97% bei Umweltzonen [4] gering erscheint im

Vergleich mit potentiellen Einsparungen anderer Emissionen bei DRG.

Unter den gemachten Annahmen besitzen Hardware-nachrüstungen ein höheres Einsparpotential bei NO_x-Emissionen als DRG. Hierbei ist zu beachten, dass eine maximale Umrüstquote von 100% zugrunde gelegt wurde, und die Schätzung einer 25%-Reduzierung zunächst nur für äußerst belastete Regionen gilt [12]. Der Minimalwert von 5,6% Reduzierung liegt hingegen lediglich bei einer geringen Akzeptanzquote der Routenempfehlungen über dem Potential von DRG.

Zusätzlich kann DRG den Energieverbrauch auch bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb senken, wenn man die Veränderungen im Spritverbrauch bei Verbrennungsmotoren überträgt. Allerdings wird der Effekt aufgrund der Rekuperationsbremse bei einem Elektrofahrzeug geringer ausfallen, da diese ohnehin einen Teil der Energie, die bei Verbrennern beim Bremsen verloren ging, wieder in den Akku einspeist.

B. Reichweite der Wirkung

Umweltzonen, Fahrverbote und DRG sind lokale Maßnahmen. Eine Senkung von Abgasemissionen in den Geltungsbereichen der ersten beiden entsteht durch einen Ausschluss bestimmter Fahrzeuge. Besonders im Fall von streckenweisen Fahrverboten bedeutete dies lediglich eine Verlagerung der Emissionen auf andere Gebiete, die damit stärker belastet werden als zuvor. Für die Gesamtemissionen des Verkehrs ist dabei keine Verbesserung zu erwarten, durch die längeren Fahrtstrecken für betroffene Fahrzeuge ist sogar eine Verschlechterung möglich. DRG schließt keine Fahrzeuge aus und ermöglicht damit eine Einsparung bei den Gesamtemissionen.

Hardwarenachrüstungen reduzieren Emissionen im gesamten Verkehr. Hierbei sei bemerkt, dass für die Nachrüstung von Partikelfiltern, mit dem Zweck in Umweltzonen einfahren zu dürfen, dasselbe gilt.

C. Dauer der Wirkung

Umweltzonen, Fahrverbote und Nachrüstungen sind in ihrer Wirkungsdauer begrenzt, da sie nur Fahrzeuge bestimmter Abgasklassen betreffen. Je mehr Neufahrzeuge zugelassen werden, umso geringer wird der Anteil betroffener Fahrzeuge, und umso mehr verringert sich der Effekt dieser Maßnahmen.

DRG hingegen kann die durchschnittlichen Abgasemissionen in dessen Installationsbereich permanent senken, unabhängig von zu einem Zeitpunkt gültigen Abgasvorschriften. Insbesondere kann dies Diskussionen um Fahrverbote, wie sie derzeit in Deutschland passieren, vorbeugen. Nimmt man eine hohe Akzeptanzquote der Routenempfehlungen an, erhält man eine NO_x-Reduzierung um etwa 15% (s. Abschnitt IV.A), womit in einigen Fällen die Überschreitung des Atemluftgrenzwerts von 40µg/m³ bereits verhindert werden könnte [13].

Durch die Eigenschaft der Selbstoptimierung eines OTC Systems ist es zusätzlich möglich, dass der Effekt der Emissionsreduzierung mit der Zeit verstärkt wird.

D. Kosten

Die Kosten der Maßnahmen können aufgrund mangelnder Daten nicht quantitativ verglichen werden. Allerdings bedeutet die theoretisch unbegrenzte Wirkungsdauer von DRG, dass die Installationskosten eines solchen Systems auf die Lebensdauer gerechnet gering ausfallen dürften. Auch sind keine hohen Wartungskosten zu erwarten, aufgrund der Selbst-X-Eigenschaften von OTC Systemen. Hierbei spielt die Selbstoptimierung wiederum eine zentrale Rolle, da so keine manuellen Optimierungen am System vorgenommen werden müssen. Des Weiteren verursacht ein DRG-System keine hohen Verwaltungskosten und keine wirtschaftlichen Schäden durch Wertverluste, im Gegensatz zu Umweltzonen [5] und Fahrverboten [18].

E. Fazit

Abschließend lässt sich, trotz unzureichender quantitativer Vergleiche, sagen, dass DRG-Systeme im Vergleich ein hohes Potential in der (lokalen) Reduzierung von Abgasemissionen haben und dabei wegen ihrer Lebensdauer mit hoher Wahrscheinlichkeit mit vergleichsweise geringen Langzeitkosten betrieben werden können. Dabei entstehen, im Gegensatz zu den anderen Maßnahmen, keine Nachteile für bestimmte Verkehrsteilnehmer.

VI. SCHLUSS UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurden neben Dynamic Route Guidance drei Umweltmaßnahmen (Umweltzonen, Fahrverbote, Hardwarenachrüstungen) vorgestellt und anschließend DRG gegenübergestellt. Dabei wurden die Wirkung auf die Emissionen, Dauer und Reichweite dieser Wirkung sowie die Kosten der Maßnahmen und einige maßnahmenspezifischen Nachteile betrachtet.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Maßnahmen ist es notwendig, einige Verbesserungen vorzunehmen. Zunächst sollte die Modellierung der Abgase bei DRG erweitert werden, um unter anderem Partikelemissionen zu beinhalten. Von hohem Interesse ist eine Analyse der möglichen entstehenden Kosten bei einer Installation eines OTC/DRG Systems, um den Unterschied zu anderen Methoden der Emissionsreduzierung beziffern zu können.

Die ersten Ergebnisse zur Auswirkung der bereits installierten Stickoxid-Fahrverbote dürften im Sommer 2019 vorliegen, dazu möglicherweise auch erneute Kostenschätzungen. Daher ist es ratsam, diese Thematik in beziehungsweise nach diesem Zeitraum erneut zu betrachten.

REFERENZEN

- [1] S. Tomforde, B. Sick und C. Müller-Schloer, "Organic Computing in the Spotlight", arXiv:1701.08125, Januar 2017.
- [2] M. Sommer, S. Tomforde und J. Hähner, An Organic Computing Approach to Resilient Traffic Management, In: T.L. McCluskey et al. (eds.), Autonomic Road Transport Support Systems, Autonomic Systems, Springer International Publishing, 2016, S. 113-130. DOI 10.1007/978-3-319-25808-9_7.

- [3] H. Prothmann, S. Tomforde, J. Lyda, J. Branke, J. Hähner, C. Müller-Schloer, und H. Schmeck (2012) Self-Organised Routing for Road Networks. In: Kuipers F.A., Heegaard P.E. (eds) Self-Organizing Systems. IWSOS 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7166. Springer, Berlin, Heidelberg, S.48-59.
- [4] W. Jiang, M. Boltze, S. Groer und D. Scheuven (2017), Impacts of low emission zones in Germany on air pollution levels, Transportation Research Procedia, Volume 25, 2017, S. 3370-3382. DOI 10.1016/j.trpro.2017.05.217.
- [5] H. W. Mayer, "Umweltzonen kosten Autofahrer 12 Milliarden Euro", PS Welt, 20.01.2009, <https://www.welt.de/motor/article3057810/Umweltzonen-kosten-Autofahrer-12-Milliarden-Euro.html>, aufgerufen am 09.01.2019.
- [6] Kraftfahrt-Bundesamt, Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2009, https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2006_2010/2009/Fahrzeugbestand/fz_bestand_01_01_09_PDF.pdf?__blob=publicationFile&v=4, aufgerufen am 09.01.2019.
- [7] M. Schäfers, "Viele Autofahrer müssen draußen bleiben", F.A.Z., 29.12.2009.
- [8] C. Ehrenstein und D. Wetzel, "Die Lösung für das Diesel-Problem könnte so einfach sein", welt.de, 28.08.2017, <https://www.welt.de/wirtschaft/article168046704/Die-Loesung-fuer-das-Diesel-Problem-koennte-so-einfach-sein.html>, aufgerufen am 09.01.2019.
- [9] o. V., "Trotz Diesel-Fahrverbot mehr Schadstoffe", ndr.de, 20.11.2018, <https://www.ndr.de/nachrichten/hamburg/Trotz-Diesel-Fahrverbot-mehr-Schadstoffe,stickoxid136.html>, aufgerufen am 09.01.2019.
- [10] Kraftfahrt-Bundesamt, Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2018, https://www.kba.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2018/pm_06_18_bestand_01_18_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=8, aufgerufen am 09.01.2019
- [11] o. V., "Dieselfahrverbot: Alle Fragen und Antworten", 2.1.2019, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/abgas-diesel-fahrverbote/fahrverbote/dieselfahrverbot-faq/>, aufgerufen am 09.01.2019
- [12] ADAC e.V. Test und Technik, "NOx-Reduzierung an Euro 5 Dieselfahrzeugen durch Hardwarenachrüstung", 20. Februar 2018, https://www.adac.de/_mmm/pdf/Langversion_Schlussbericht_%20ADAC_Euro5_Nachr%C3%BCstung_20022018_316149.pdf, aufgerufen am 09.01.2019
- [13] o.V., Die Stickstoffdioxid Werte in Deutschland in 2015-2017, <https://www.blaue-plakette.de/de/info-blaue-plakette/stickoxide-nox/no2-werte-in-deutschland.html>, aufgerufen am 01.09.2019.
- [14] A. Sen und P Thakuriah, Estimation of Static Travel Times in a Dynamic Route Guidance System, In: Mathematical and Computer Modelling Volume 22, Issues 4–7, August–Oktober 1995, S. 83-101.
- [15] N. Cui, B. Chen, K. Zhang, Y. Zhang, X. Liu und J. Zhou, Effects of route guidance strategies on traffic emissions in intelligent transportation systems, In: Physica A: Statistical Mechanics and its Applications Volume 513, 1. Januar 2019, S. 32-44.
- [16] C. Laberer und M. Niedermeier, Wirksamkeit von Umweltzonen, https://www.adac.de/_mmm/pdf/umweltzonen_wirksamkeit_bericht_0609_43574.pdf, aufgerufen am 09.01.2019.
- [17] H. Prothmann, Organic traffic control, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 30.09.2011.
- [18] o.V., "Modellrechnung von F. Dudenhöffer: Diesel-Fahrverbote würden 15 Milliarden Euro kosten", Automobilwoche, 04. August 2017, <https://www.automobilwoche.de/article/20170804/AGENTURMELDUNGEN/308049989/modellrechnung-von-f-dudenhoeffer-diesel-fahrverbote-wuerden--milliarden-euro-kosten>, aufgerufen am 09.01.2019.
- [19] B. Müller, M. Balsler und M. Bauchmüller, "Das müssen Diesel-Fahrer wissen", Süddeutsche Zeitung, 15. November 2018, <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/fahrverbot-diesel-fragen-antworten-1.4210634>, aufgerufen am 27.02.2019.
- [20] A. Meyer-Fünffinger und J. Streule, "Weg für Diesel-Nachrüstung frei", tagesschau.de, 28. Dezember 2018, <https://www.tagesschau.de/inland/diesel-hardware-nachruetzung-101.html>, aufgerufen am 27.02.2019.