

# Quantifizierung verkehrsbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Grundlage von extended Floating Car Data

Gernot Pucher

TraffiCon – Traffic Consultants GmbH, Salzburg · pucher@trafficon.eu

Short paper

## Zusammenfassung

Trotz der Entwicklung energieeffizienterer Fahrzeugtechnologien weist der Verkehrssektor global ein besonders starkes fortlaufendes Wachstum an CO<sub>2</sub>-Emissionen auf, mit einem Plus von 44 % zwischen 1990 und 2008. Verkehrssteuernde Maßnahmen können zur Minderung des verkehrsbedingten Ausstoßes von CO<sub>2</sub> beitragen. Derartige Maßnahmen können durch die Bereitstellung hochauflösender Information über die räumliche und zeitliche Verteilung von verkehrsbedingten Emissionen unterstützt und effizient gestaltet werden. Üblicherweise werden dazu Verkehrsemissionsmodelle eingesetzt, die jedoch häufig in ihrer räumlich-zeitlichen Auflösung stark eingeschränkt sind, was vor allem auf fehlende Datengrundlagen zurückzuführen ist. Als potenzielle Datenquelle für Emissionsmodelle können „extended Floating Car Data (xFCD)“ herangezogen werden. Dabei werden über das Fahrzeugdiagnosesystem (ODB-2) verschiedene Parameter wie etwa Geschwindigkeit, Motordrehrate oder Kraftstoffverbrauch aus der Fahrzeugelektronik aufgezeichnet, während das Fahrzeug regulär im Straßenverkehr partizipiert. Diese Parameter können in kurzen Intervallen (1 Hz) übertragen und zudem mit den GPS-Positionen zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt korreliert werden, wodurch eine hochauflösende räumliche und zeitliche Zuordnung der aufgezeichneten Daten möglich ist. Forschungen zum systematischen Einsatz von xFCD für eine räumlich-zeitliche Quantifizierung von verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden bislang jedoch noch nicht durchgeführt. Daher soll eine Methodik entwickelt und evaluiert werden, die es ermöglicht auf der Grundlage von Verbrauchsmessungen aus xFCD Einzeltrajektorien hochauflösende repräsentative CO<sub>2</sub>-Emissionswerte zu berechnen.

## 1 Einführung und Zielsetzung

Die anthropogene Zufuhr klimaaktiver Gase wird als Hauptursache für Änderungen der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre und den daraus resultierenden Klimawandel betrachtet (IPCC 2013). Das häufigste dieser sogenannten Treibhausgase ist Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), welches unter anderem bei der Verbrennung fossiler Energie freigesetzt wird. Trotz der Entwicklung energieeffizienterer Fahrzeugtechnologien weist der Verkehrssektor global ein besonders starkes fortlaufendes Wachstum an CO<sub>2</sub>-Emissionen auf, mit einem Plus von 44 % zwischen 1990 und 2008. Dies ist auf den steigenden Kraftfahrzeugbesitz insbesondere in Schwellenländern zurückzuführen (VAN WEE et al. 2011).

Für das Jahr 2013 werden dem Verkehrssektor in der Europäischen Union insgesamt 20 % aller anthropogen emittierten Treibhausgase zugeschrieben (EEA 2014).

Durch die Bereitstellung von Informationen über die Ausprägung, das räumliche Auftreten und die zeitliche Dynamik von Emissionen innerhalb eines Straßennetzwerks könnten Maßnahmen zur Reduzierung verkehrsbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen zielgerichteter und kosteneffizienter implementiert werden (GURNEY et al. 2012). Aktuell angewandte Methoden zur Quantifizierung von Verkehrsemissionen sind aufgrund fehlender Datengrundlagen jedoch hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung beschränkt oder werden nur an stationären Straßenquerschnitten durchgeführt (GATELY et al. 2013, SMIT et al. 2008). Der Einsatz moderner Kommunikations- und Informationstechnologien im Verkehrswesen, der auch unter dem Begriff „Intelligent Transport Systems“ (ITS) subsummiert wird, ermöglicht neue Formen der Generierung verkehrsbezogener Daten (EZELL 2010). Ein Ansatz ist jener der „extended Floating Car Data“ (xFCD). Dabei werden über das Fahrzeug-Diagnose-System verschiedene Parameter aus der Fahrzeugelektronik ausgelesen, wie etwa Motordrehrate, Geschwindigkeit oder auch der Kraftstoffverbrauch. Zudem werden bei jedem Aufnahmeintervall auch GPS-Koordinaten und Zeitstempel übertragen, wodurch eine räumliche und zeitliche Zuordnung der aufgezeichneten Daten möglich ist. Durch den Einsatz von xFCD in Fahrzeugen die am regulären Verkehrsgeschehen teilnehmen, können so fahrzeug- und verkehrsbezogene Informationen unter Echtwelt-Bedingungen generiert werden (BREITENBERGER et al. 2004). Da CO<sub>2</sub>-Emissionen ein Produkt der Verbrennung fossiler Treibstoffe darstellt, kann der Kraftstoffverbrauch eines durch fossile Energie betriebenen Fahrzeugs in direktem Zusammenhang mit dessen CO<sub>2</sub>-Emissionen gebracht werden (SINGER et al. 2011). Durch die Verwendung von xFCD ergibt sich so das Potenzial zur Zuordnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen mit hoher räumlicher sowie zeitlicher Auflösung. Forschungen zum systematischen Einsatz von xFCD für eine räumlich-zeitliche Quantifizierung von verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden bislang jedoch noch nicht durchgeführt (KRAMPE et al. 2013). Daher soll eine Methodik entwickelt und evaluiert werden, die es ermöglicht auf der Grundlage von Verbrauchsmessungen aus xFCD Einzeltrajektorien hochauflösende repräsentative CO<sub>2</sub>-Emissionswerte zu berechnen. Dabei sollen auch tageszeitliche Änderungen von Emissionswerten in Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen und -qualität am jeweiligen Straßensegment abgebildet werden.

## 2 Datengrundlagen

Zur Generierung der notwendigen Datengrundlage an xFC-Daten wurden zwischen November 2013 und Oktober 2014 128 Einzelmessfahrten mit einer Streckenlänge von insgesamt 513 km in der Stadt Salzburg und Umgebung durchgeführt. Dabei wurden der Kraftstoffverbrauch in  $\mu\text{l}$ , die Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h, GPS-Koordinaten sowie Zeitstempel in einem Übertragungsintervall von 1 Hz aufgezeichnet. Zum Auslesen der Fahrzeugdaten wurde ein Diagnosescanner der Marke tinxi and die OBD-II Schnittstelle eines benzinbetriebenen BMW Mini R56 angebracht. Die Daten wurden in Echtzeit über Bluetooth an ein Android Smartphone übermittelt und dort als .gpx-Dateien gespeichert. Anschließend wurden die Messdaten in eine räumliche Analysedatenbank importiert, wo zunächst fehlerhafte Einträge identifiziert und bereinigt wurden. Über ein Map-Matching Verfahren wurden die Punktdaten auf die Segmente eines strategischen GIP-Straßengraphens referenziert.

Als zeitliche Referenzeinheit zur Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden 15-Minuten-Intervalle gebildet und den segmentspezifischen xFC-Daten zugeordnet. Für die Quantifizierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen stehen neben den aufgezeichneten xFC-Daten auch Querschnittsmessungen des Verkehrsvolumens aus stationären Detektoren des Landes Salzburg, Daten zu der Verkehrszusammensetzung in Salzburg aus der „Statistik der Kraftfahrzeuge 2014“ der Statistik Austria sowie auf den GIP-Straßengraphen referenzierte FC-Daten mit mittleren momentanen Geschwindigkeiten aus dem Projekt „FCD-Modellregion Salzburg“ zur Verfügung.

### 3 Vorgehen

Aus der Datenbasis der vorliegenden Kraftstoffverbrauchsdaten aus Einzelfahrten soll ein repräsentativer Verbrauchswert („Emissionsfaktor“) für das jeweilige Straßensegment und 15-Minuten-Intervall berechnet werden. Über die Verschneidung dieses verbrauchsbasierenden Emissionsfaktors mit dem Verkehrsaufkommen, der Verkehrszusammensetzung und der Verkehrsflussqualität wird die absolute verkehrsbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen im jeweiligen räumlich-zeitlichen Kontext ermittelt. Zur Berechnung eines derartigen verbrauchsbasierenden Emissionsfaktors aus xFCD wurden über eine vergleichende Analyse aktuell eingesetzter Verkehrsemissionsmodelle folgende potenzielle Methoden identifiziert und weiterentwickelt (BOULTER et al. 2007, LI et al. 2011, MA et al. 2011, SMIT et al. 2010, SPENCE et al. 2009):

- Mittelwert gemessener Kraftstoffverbrauchsdaten je Segment, 15-Minuten-Intervall und Wochentag.
- Bildung eines repräsentativen Geschwindigkeitsprofils je Segment, 15-Minuten-Intervall und Wochentag und Zuordnung eines passenden Kraftstoffverbrauchsprofils durch ein Verfahren zur Ähnlichkeitsmessung von Zeitreihen.
- Multiple Regressionsanalyse mit gemessenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen je Segment, 15-Minuten-Intervall und Wochentag als unabhängige Variablen und Kraftstoffverbrauch je Segment, 15-Minuten-Intervall und Wochentag.

Emissionsmodelle, die gemittelte Geschwindigkeitswerte von Fahrzeugen als hauptsächliche Emissionsfaktoren heranziehen haben aufgrund der niedrigen Anforderungen an Datengrundlagen und ihr vergleichsweise geringen Komplexität hohe Verbreitung gefunden (SMIT et al. 2010). In der Praxis zeigt sich jedoch, dass verbrauchsbasierte Verkehrsemissionen durch mittlere Geschwindigkeiten nur unzureichend erklärt werden können (CAPIELLO 2002). Durch die Verwendung von direkt aus Fahrzeugen gemessenen Kraftstoffverbrauchsdaten werden die mittleren Geschwindigkeiten zur Berechnung des Verbrauchs überflüssig. Diese xFCD-Kraftstoffverbrauchsdaten werden analog zum Vorgehen in Emissionsmodellen mit mittleren Geschwindigkeiten anhand spezifischer räumlich-zeitlicher Merkmalskategorien aggregiert und gemittelt.

Eine weitere im Rahmen dieser Arbeit angewandte Methode zum Einsatz von xFCD-Kraftstoffverbrauchsdaten für die Bestimmung von CO<sub>2</sub>-Emissionen beruht auf dem Prinzip von Emissionsmodellen die Emissionsfaktoren auf der Grundlage von spezifischen Verkehrssituationen bestimmen. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass die Dynamik des Verkehrs und die daraus resultierenden Geschwindigkeitsprofilen der am Verkehr teilnehmenden

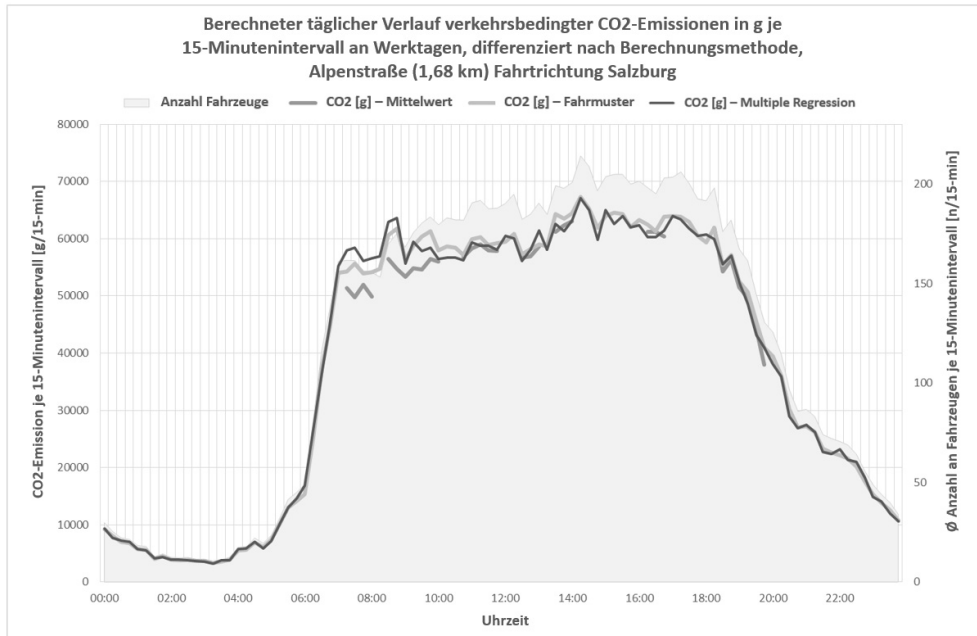
Fahrzeuge zu Änderungen des fahrzeugspezifischen Verbrauchs führen. Die üblicherweise verwendeten Verkehrssituationen sind in der Regel jedoch zu grob oder subjektiv klassifiziert, sodass deren Einsatz für hochauflösende Emissionsbestimmungen beschränkt ist (JOURNARD et al. 2007). Über xFCD kann der Geschwindigkeitsverlauf eines Fahrzeugs in kurzen Intervallen aufgezeichnet und mit dem dabei registrierten Kraftstoffverbrauch in Beziehung gesetzt werden. Durch die Generierung repräsentativer Geschwindigkeitsverläufe im jeweiligen räumlichen-zeitlichen Kontext können so auf Grundlage der Verkehrsdynamik repräsentative Verbrauchswerte ermittelt werden. Um diese repräsentative Muster aus Einzelfahrzeugtrajektorien zu erzeugen, wird in der vorliegenden Arbeit der „DTW Barycenter Averaging“ Algorithmus angewandt, der die minimale Summe der quadrierten Distanzen zwischen den Messpunkten der unterschiedlichen Trajektorien berechnet.

Die letzte angewandte Berechnungsmethode stellt ein multiples Regressionsmodell dar, welches Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aus Fahrzeugtrajektorien als unabhängige Variablen und den Kraftstoffverbrauch als abhängige Variable verwendet. In konventionellen Regressionsmodellen zur Bestimmung von Verkehrsemissionen werden dazu oftmals Daten aus mikroskopischen Simulationsmodellen oder aus Labortests herangezogen, die oftmals tatsächliches Fahrzeugverhalten nur unzureichend abbilden (SMIT et al. 2010).

## 4 Ergebnisse und Fazit

Die entwickelten Berechnungsmethoden von verbrauchsbasierten Emissionsfaktoren werden entlang ausgewählter Teststrecken in Salzburg evaluiert. Für die in der Verlaufskurve in Abbildung 1 abgebildete, 1,68 km lange Strecke der Alpenstraße von der Ortsausfahrt Anif bis zur Einfahrt in das Stadtgebiet im Süden Salzburgs ergeben sich an Werktagen bei der Annahme verkehrlicher Standardsituationen je nach Berechnungsmethode CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 3,713,806 und 3,696,903 g. Die Verlaufskurve der CO<sub>2</sub>-Emissionen (Abb. 1) ist differenziert nach Berechnungsmethoden für Werktage zwischen November 2013 und Oktober 2014 dargestellt. Auf der Sekundärachse ist zudem das Verkehrsaufkommen je 15-Minuten-Intervall dargestellt. Die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden für die Zeit zwischen 14:00 Uhr und 14:15 Uhr berechnet, jenem Zeitintervall mit dem höchsten Verkehrsaufkommen. Eine weitere Spitze fällt zwischen 08:45 Uhr und 09:00 Uhr, wo der Durchfluss an Fahrzeugen zwar geringer ist, jedoch der Verkehr stockender verläuft. Dadurch werden Verkehrsteilnehmer zu verbrauchintensiveren Fahrweisen gezwungen, was durch die berechneten Emissionsfaktoren abgebildet wird.

Der Einsatz des Mittelwerts zur Berechnung eines verbrauchsbasierten Emissionsfaktors aus xFCD Fahrten ist aufgrund hoher Standardabweichungen nur bei Vorhandensein von einer ausreichenden Zahl an Fahrten (Ø mindestens 73 Fahrten) mit Kraftstoffverbrauchsmessungen je Straßensegment und 15-Minuten-Intervall zulässig, was eine zeit- und kostenintensive Messkampagne voraussetzt. Die verwendeten unabhängigen Variablen Geschwindigkeit und Beschleunigung in der multiplen Regressionsgleichung können die Varianzen des Kraftstoffverbrauchs nur unzureichend erklären. In die Berechnung müssten daher weitere Parameter wie Gangschaltung und Motorlast einfließen, die den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs genauer abbilden (TREIBER et al. 2007). Die besten Ergebnisse konnten durch die entwickelte zeitreihenbasierte Methode erzielt werden. Durch die Bil-



**Abb. 1:** Berechneter des täglichen Verlaufs verkehrsbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang einer Teststrecke in Salzburg

dingung eines repräsentativen Geschwindigkeitsprofils aus allen im untersuchten räumlich-zeitlichen Kontext aufgezeichneten Fahrzeugtrajektorien und die ähnlichkeitsbasierte Zuordnung von gemessenen Kraftstoffverbrauchsprofilen, können unter dem Einsatz einer vergleichsweise geringen Datenbasis durchgängige, valide und plausible verbrauchs-basierte Emissionsfaktoren in hoher räumlich-zeitlicher Auflösung gebildet werden.

Aus den Untersuchungsergebnissen zeigt sich bei entsprechendem methodischem Vorgehen ein hohes Potenzial für den systematischen Einsatz von xFCD zur verbesserten hochauflösenden Quantifizierung verkehrsbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die gewonnenen Erkenntnisse zu Anforderungen hinsichtlich Umfang, Abdeckung, Dimensionalität und Prozessierung von xFCD bilden die Grundlage für weitere Forschungsvorhaben sowie für den potenziellen Einsatz in einem Testfeld.

## Literatur

- BREITENBERGER, S., GRÜBER, B. & NEUHEURZ, M. (2004), Extended Floating Car Data – Potenziale für die Verkehrsinformation und notwendige Durchdringungsraten. *Straßenverkehrstechnik*, 10, 522-531.
- BOULTER, P. G., MC CRAE, I. S. & BARLOW, T. J. (2007), A review of instantaneous emission models for road vehicles. TRL report PPR 267. Wokingham, TRL Limited.
- CAPIELLO, A (2002), Modelling Traffic Flow Emissions. Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA.

- EZELL, S. (2010), *Intelligent Transportation Systems*. The Information Technology & Innovation Foundation, Washington DC.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge/New York.
- GATELY, C. K., HUTYRA, L. R. & BRONDFIELD, M. N. (2013), A bottom-up Approach to on-Road CO<sub>2</sub>-Emissions Estimates. *Environmental Science & Technology*, 47, 2423-2430.
- GURNEY, K. R., RAZLIVANOV, I., WING, I. S. & YANG, S. (2012), Quantification of fossil fuel CO<sub>2</sub>-Emissions on the Building/Street scale for a large U.S. city. *Environmental Science & Technology*, 46, 12194-12202.
- JOURNARD, R., ANDRE, J. M. & RAPONE, M. (2007), *Emission Factor modelling and database for light vehicles*. Artemis deliverable 3 Inrets Report, Bron.
- KRAMPE, S., LEITINGER, S., PUCHER, G. & REHRL, K. (2013), FCD Modellregion Salzburg – Einsatz und Nutzen von Extended Floating Car Data im Bundesland Salzburg. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hrsg), *Angewandte Geoinformatik 2013*. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 450-455.
- LI, Q., ZHANG, T., WANG, H. & ZENG, Z. (2011), Dynamic accessibility mapping using floating car data. *Journal of Transport Geography*, 19, 379-393.
- MA, X., LEI, W., ANDREASSON, I. & CHEN, H. (2011), An Evaluation of Microscopic Emission Models for Traffic Pollution Simulation Using On-board Measurement. *Environmental Modelling & Assessment*, 17, 375-387.
- SINGER, B., KIRCHSTETTER, T., HARLEY, R., KENDALL, G. & HESSON, J. (2011), A Fuel-Based Approach to Estimating Motor Vehicle Cold-Start Emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 125-135.
- SMIT, R., NTZIACHRISTOS, L. & BOULTER, P. (2010), Validation of road vehicle and traffic emission models e a review and meta-analysis. *Atmospheric Environment*, 44, 2943-2953.
- TREIBER, M., KESTING, A. & THIEMANN, C. (2007), *How Much does Traffic Congestion Increase Fuel Consumption and Emissions?* Submission for the Annual Meeting of the Transportation Research Board 2008.
- VAN WEE, B., ANNEMA, J. A. & BANISTER, D. (2013), *The Transport System and Transport Policy*. Cheltenham/Northampton, Edward Elgar Publishing.