



Messungen der NO_x-Emissionen Berliner Stadtbusse im realen Fahrbetrieb mittels zweier Messverfahren

Untersuchungszeitraum: 27. Oktober – 27. November 2020 in der Berliner Innenstadt

Berlin, 18. August 2021

Projektleiter
Dr. A. Friedrich

Stellvertretender Projektleiter
S. Annen



Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	3
2	Messverfahren.....	4
2.1	Plume Chasing	4
2.2	PEMS.....	5
2.3	Herausforderungen	5
3	Vorstellung der Messergebnisse	6
4	Vergleich der Verfahren	8
5	Ausblick.....	10
6	Literaturverzeichnis.....	11

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1	Plume Chasing Verfahren.....	4
Abb. 2	Grafische Darstellung der Ergebnisse der Messungen	6
Tab. 3	Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der Messungen.....	7



1 Vorwort

Dieser Bericht beinhaltet die Ergebnisse einer Messreihe, welche im Zeitraum vom 27. Oktober bis 27. November 2020 durch das Emissions-Kontroll-Institut (EKI) der Deutschen Umwelthilfe (DUH) in Kooperation mit dem TÜV Nord und der Berliner Senatsverwaltung an acht Bussen der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) durchgeführt wurde. Der TÜV Nord führte die Messungen mit einer sogenannten PEMS Anlage, Portable Emission Measurement System, durch, welche in den Bussen die Abgasemissionen ermittelt. Die parallel durchgeführten Messungen des EKI erfolgten mittels Plume Chasing Verfahren, welches unter Punkt 2, Messverfahren, genauer vorgestellt wird. Bei den beiden Messverfahren wurden die Stickoxidemissionen verschiedener BVG Busse im realen Straßenbetrieb gemessen und verglichen.

Das Ziel dieser Untersuchungen soll es sein die Eignung des Plume Chasing Verfahrens als eine kostengünstige und schnelle Messmethode an Stadtbussen zu überprüfen. Diese Methode wird schon zur Ermittlung von hochemittierenden Lkw erfolgreich eingesetzt. Damit können unzureichende, defekte oder manipulierte Abgasreinigungssysteme im laufenden Betrieb leicht ausfindig gemacht werden, ohne dass an dem zu untersuchenden Fahrzeug selbst mit großem Aufwand eine PEMS-Messung durchgeführt werden muss. Für die Eignung des Plume Chasing Verfahrens an Stadtbussen wurden die erfassten Daten des EKI mit den Daten der PEMS Messungen des TÜV Nord miteinander verglichen.

2 Messverfahren

2.1 Plume Chasing

Die Messungen der NO_x -Emissionen der Busse durch das EKI im realen Straßenbetrieb erfolgte nach dem Plume Chasing Verfahren mittels eines ICAD NO_x und CO_2 Analysator der AirYX GmbH. Hierbei wird durch einen vorne am Messfahrzeug befestigten Schlauch eine geringe Menge der Abgasfahne des vorausfahrenden Fahrzeugs in das Messgerät im Wageninneren angesaugt, siehe Abbildung 1.

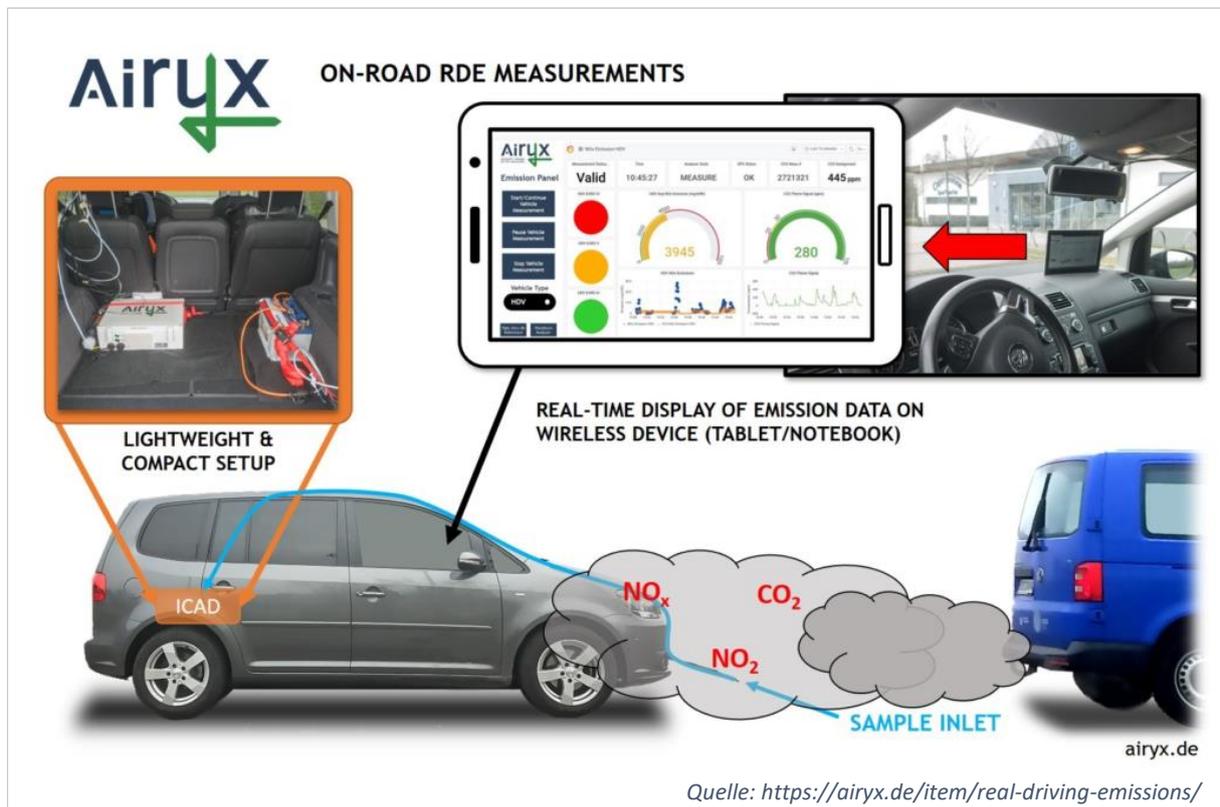


Abb. 1 Plume Chasing Verfahren

Dort wird das Abgas-Luft-Gemisch mit einem hochgenauen Spektrometer analysiert. Das Messfahrzeug folgt während der Messzeit dem zu untersuchenden Bus für kurze Zeit, sodass über die angesaugte Abgasfahne des Busses eine repräsentative Emissionsberechnung erfolgen kann. Hierfür wird durch die Messapparatur das Konzentrationsverhältnis von CO_2 und NO_x aus der Abgasfahne bestimmt, welches unabhängig vom Verdünnungsverhältnis ist. Daraus kann dann durch mathematische Verfahren Rückschluss auf den Emissionswert des vorausfahrenden Fahrzeugs gezogen werden.

Dafür wird ein CO_2 Schwellwert definiert, welcher ausreichend über der lokalen CO_2 Hintergrundbelastung liegt, um sicherzustellen, dass sich das Messfahrzeug in der Abgasfahne des vorausfahrenden Fahrzeugs befindet. Erst oberhalb dieses Schwellwertes werden die Emissionswerte ermittelt. Üblicherweise wird ein Schwellenwert der CO_2 -Konzentration von mindestens 30 parts per million (ppm) über der Hintergrundkonzentration gewählt. Unter den vorliegenden Messbedingungen konnten in der Praxis häufig Werte von deutlich über 100 ppm über der Hintergrundimmission erreicht und somit viele valide Messdaten gesammelt werden.

2.2 Messungen des TÜV Nord

Der TÜV Nord führte parallel an denselben Fahrzeugen Messungen mit einer PEMS Anlage an den Bussen der BVG im realen Fahrbetrieb auf der Straße durch. Dabei wird unter anderem der Stickoxid- (NO_x) und Kohlenstoffdioxidausstoß (CO_2) ermittelt, indem aus dem Abgasstrom ein kleiner Teil der Abgase in der PEMS Anlage analysiert und anschließend über den gleichzeitig erfassten Gesamtvolumenstrom die Schadstoffemissionen berechnet werden.

Ziel der Messungen ist es, herauszufinden, ob die Fahrzeuge wie vorgeschrieben auch unter normalen Fahrbedingungen ordnungsgemäß funktionieren.

Bei den Messungen des TÜV Nord wurde an eine PEMS- Messanlage des Herstellers Sensors verwendet.

2.3 Herausforderungen

Die indirekte Bestimmung der Emissionen per Plume Chasing ist prinzipiell auf den Betrieb des zu messenden Fahrzeugs im optimalen Betriebsbereich ausgelegt. Dies ist bspw. Bei LKW auf Autobahnen der Fall, wenn eine relativ konstante Last vom Motor abgefragt wird. Da das Verfahren die NO_x -Emissionen in mg/kWh ermittelt, ist trotz Schwankungen der Leistungen die festgestellten NO_x -Emissionen gut reproduzierbar.

Die große Herausforderung bei den Messungen an Stadtbussen ist, im dichten Stadtverkehr den Einfluss anderer Fahrzeuge zu minimieren, sowie die Grenzbereiche des Betriebsbereichs, wie Vollast oder Schubabschaltung, entsprechend ihrer Abweichungen im Messverfahren angemessen zu berücksichtigen. Für die in diesem Bericht vorgestellten Messungen wurde für die Auswertung der Wirkungsgrad über die CO_2 -Emissionen, die bei den PEM Messungen ermittelt wurden, herangezogen. Näheres dazu im Abschnitt 4.

Vergleichsmessungen mit den Sensors PEMS Geräten des EKI der DUH in Randbezirken Berlins in 2019 haben gezeigt, dass diese Verfahren vergleichbare Emissionswerte ergeben. (DUH, 2019)

Bei den PEMS Messungen besteht die Herausforderung darin, die Drift der Kalibrierung zu minimieren, sowie das Offset der Laufzeit der Abgase innerhalb des Messsystems möglichst genau zu bestimmen, da beim Betrieb der Busse sehr hohe Lastwechsel stattfinden und die Volumenströme sowohl an anderer Stelle, als auch mit zeitlicher Differenz der Gaskonzentrationsmessung erfolgt.

3 Vorstellung der Messergebnisse

Alle teilnehmenden Busse konnten mit beiden Messverfahren erfolgreich gemessen werden. Aus Abb. 2 ist ersichtlich, dass sowohl niedrig-, als auch hochemittierende Fahrzeuge mit beiden Messverfahren zuverlässig identifiziert werden konnten.

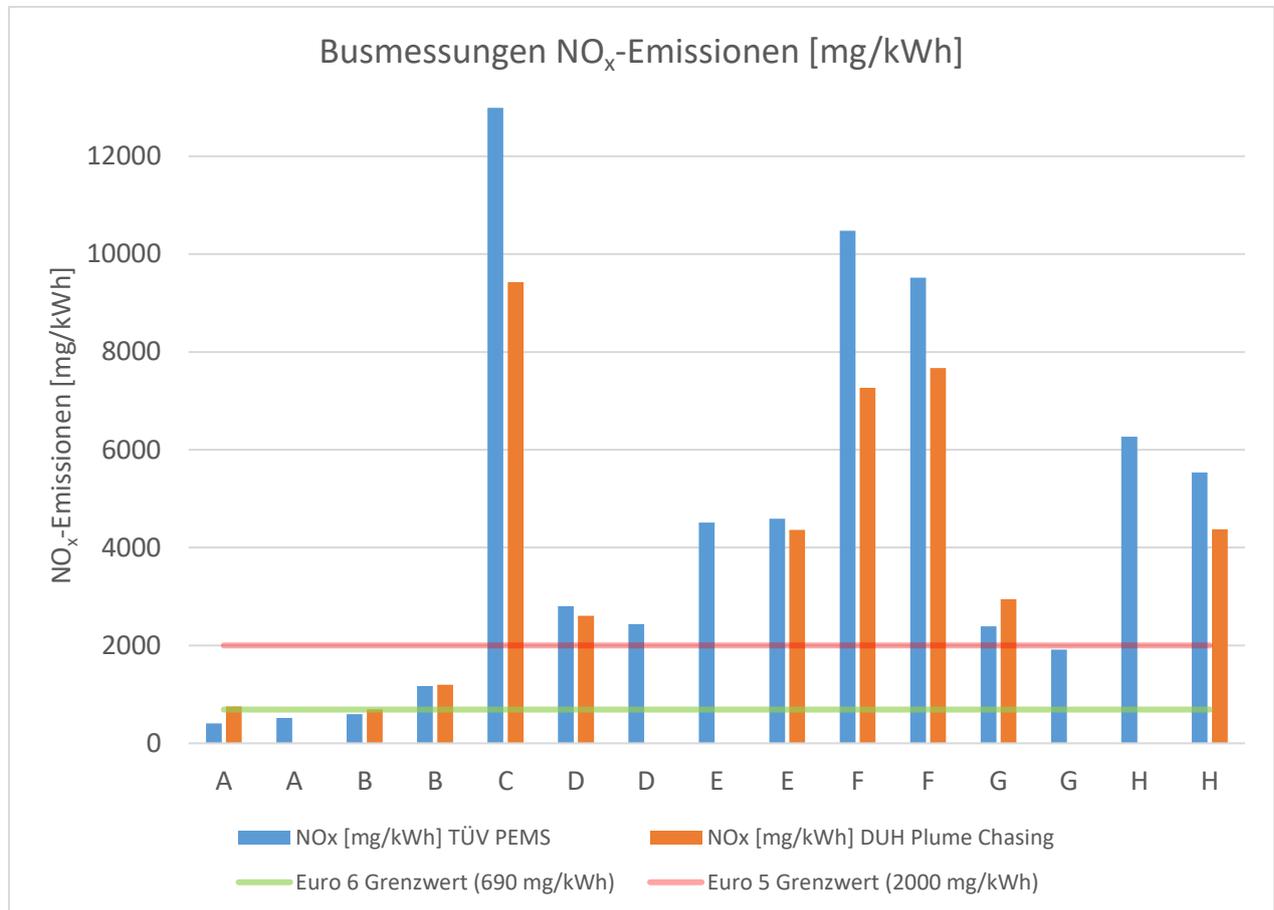


Abb. 2 Grafische Darstellung der Ergebnisse der Messungen

Insbesondere bei sehr hohen NO_x-Konzentrationen kann das Plume Chasing Verfahren an seine Grenzen kommen. Hier sind Anzeichen einer Sättigung des NO_x Messgerätes zu beobachten. Das ist im Speziellen dem dichten Stadtverkehr geschuldet, der eine sehr nahe „Verfolgungsfahrt“ erfordert, wodurch hier eine, für das Messverfahren notwendige Verdünnung der Abgase manchmal wird.

LKW Messungen des EKI haben gezeigt, dass bei gleichförmigen Verfolgungsfahrten lokal relativ isolierter Fahrzeuge (HDV) bei einem höheren Verdünnungsgrad der Abgase, auch noch hohe Emissionen darstellbar sind. (DUH, S. Annen, R. Helmerich, 2020)

Die Abweichungen der Messverfahren untereinander liegen zwischen 2 und 46 Prozent, wobei höhere Abweichungen sowohl bei sehr niedrigen Werten, also eher geringeren absoluten Abweichungen, als auch im möglichen Sättigungsbereich des Plume Chasing Verfahrens zu beobachten sind. Die gemessenen Werte sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.



Bus	Bus	TÜV PEMS NOx [mg/kWh]	DUH Plume Casing ICAD NOx [mg/kWh]
MB_Citaro G_EUVI-D_B-V 4951_M27	A	405	755
MB_Citaro G_EUVI-D_B-V 4951_M27	A	516	-
MB_Citaro G_EUVI-C_B-V 4785_M27	B	593	697
MB_Citaro G_EUVI-C_B-V 4785_M27	B	1.171	1.195
MAN_A39DD_Twintec_B-V 3154_M27	C	12.990	9.429
VDL_Citea LLE 120_B-V 2389_M27	D	2.799	2.604
VDL_Citea LLE 120_B-V 2389_M27	D	2.437	-
MAN_A39DD_HJS_B-V 3315_M27	E	4.513	-
MAN_A39DD_HJS_B-V 3315_M27	E	4.589	4.363
MAN_A39DD_Twintec_B-V 3154_M27	F	10.480	7.266
MAN_A39DD_Twintec_B-V 3154_M27	F	9.519	7.668
SOLARIS Urbino18_EUROIII_HJS_B-V 4175_M27	G	2.394	2.945
SOLARIS Urbino18_EUROIII_HJS_B-V 4175_M27	G	1.913	-
SOLARIS Urbino18_EEV_B-V 4263_M27	H	6.270	-
SOLARIS Urbino18_EEV_B-V 4263_M27	H	5.536	4.376

Tab. 3 Tabellarische Übersicht der Ergebnisse der Messungen



4 Vergleich der Verfahren

PEMS Messungen, unter anderem die des EKI, haben gezeigt, dass das PEMS Verfahren mit den Geräten der Firma Sensors sehr akkurate Messwerte produziert. Durch die direkte Entnahme des Abgases am Auspuffendrohr des Fahrzeugs ist bei korrekter Kalibrierung und fehlerfreiem Betrieb eine sehr hohe Genauigkeit der Messwerte, mit einer maximalen Abweichung von wenigen parts per million (ppm), erreichbar. (DUH, Dr. A. Friedrich, S. Annen, R. Helmerich, 2016 - 2021)

Der Nachteil ist der zu betreibende Aufwand. Die vorliegenden PEMS Geräte benötigen eine Aufwärmphase mit anschließender Kalibrierung durch Referenzgase. Die Geräte müssen unter teils sehr komplexen Bedingungen an die zu messenden Fahrzeuge angeschlossen werden. Häufig ist ein solcher Anbau nicht trivial. Selbst unter guten Bedingungen stellt die Messung eines einzelnen Fahrzeugs binnen eines vollen Arbeitstages eine beachtliche Herausforderung dar.

Das Plume Chasing Verfahren mit dem ICAD NO_x und CO₂ Analysierer der Firma AirYX kann unter geeigneten Bedingungen ebenfalls genaue Messwerte produzieren, ist jedoch anfälliger für externe Einflüsse. Speziell die Messungen an BVG Bussen im dichten Berliner Stadtverkehr, unter dem Einfluss vieler weiterer Verkehrsteilnehmer und unter ständigem Lastwechsel des zu messenden Fahrzeugs, erfordern eine umfassendere Datenauswertung als üblich. Hierzu mussten aus den Rohdaten Abschnitte von Vollast und Schubabschaltung des zu messenden Fahrzeugs von der Auswertung ausgeschlossen werden und die weiteren Lastwechsel durch einen Effizienzfaktor k auf die durchschnittliche Effizienz vorliegender Fahrzeuge im vornehmlichen Betriebsbereich normalisiert werden. Der Referenzwert zur Bestimmung von k wurde für Lkw auf 665 Gramm CO₂ pro Kilowattstunde festgelegt. Dieser Wert ist jedoch für Stadtbusse zu niedrig. Deshalb wurde jede Messung eine eigenes k bestimmt.

$$k = \frac{e}{665 \left[\frac{g}{kWh} \right]}$$

Mit: k : Effizienzfaktor, e : TÜV PEMS (Brake Specific) CO₂ Emission [g/kWh] der jeweiligen Messung

Eine weitere mögliche Ursache der Abweichungen zu den PEMS Messungen des TÜV ist, das durch den Ausschluss von Messintervallen nicht valider Daten in der Auswertung keine vollständig kontinuierliche Datenauswertung, wie bei den PEMS Messungen, erfolgt ist.

Zusätzlich erschwert die dynamische Erfassung des CO₂ Hintergrunds, welcher im Stadtverkehr einer hohen Volatilität durch den Einfluss anderer Fahrzeuge unterworfen ist, die Ermittlung der validen Werte. In dieser Untersuchung wurde daher stets ein Abstand von 30 ppm CO₂ zum jeweils aktuellen dynamischen und nicht zum statischen Hintergrund vom Beginn der Messung berücksichtigt, um eventuelle Fehlvalidierungen auszuschließen. Dies schränkt jedoch die Menge der erfassten Datenpunkte weiter ein. Bei allen Messungen lagen jedoch ausreichende Messpunkte vor, da die Gesamtdauer der Messungen für Ermittlung von Emissionsfaktoren mehr als ausreichend war. Für zukünftige Messungen sollten deshalb Strecken gewählt werden, die weniger Störfaktoren erzeugen.



Die Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass sich mit dem Plume- Chasing Verfahren insgesamt sehr zuverlässig hochemittierende Fahrzeuge identifizieren lassen. Der große Vorteil des Verfahrens ist, dass sich eine hohe Anzahl an Fahrzeugen in einem überschaubaren Zeitraum und Aufwand ohne Störung des Busbetriebes hinreichend genau vermessen lässt. Eine umfangreiche Vorbereitung oder Kalibrierung ist nicht nötig.

Auch wenn für die hier vorliegenden Messungen viele Hundert Datenpunkte pro Fahrzeug und Messung gesammelt wurden, zeigen sowohl bisherige Messungen des EKI, als auch des Geräteherstellers, dass schon 45 valide Datenpunkte, entsprechend teils nur wenige Minuten Verfolgungsfahrt, valide Ergebnisse produzieren. Erste Indizien für niedrig- oder hochemittierende Fahrzeuge lassen sich oft sogar schon nach nur einem Duzend valider Messpunkten feststellen.
(AirYX, Dr. Denis Pöhler, 2020)

5 Ausblick

Somit ist das Plume Chasing Verfahren, speziell im Stadtverkehr, geeignet, Flotten an Fahrzeugen kostengünstig zu überwachen. Als hochemittierend identifizierte Fahrzeuge können dann einer technischen Überprüfung zugeführt werden.

Nach Möglichkeit sollten Plume Chasing Messungen nicht im hochdichten Verkehr oder im Stop and Go Berufsverkehr angewandt werden, da die externen Einflüsse die Messgenauigkeit des Verfahrens u.U. mindern kann.

Es sollte zukünftig ein NO_x -Schwellwert festgelegt werden um, entsprechend der Abgasnorm, Hochemittenten zu definieren. Bei LKW (HDV) Messungen des EKI wurde dieser Wert beispielsweise für Euro 6 (690 mg/kWh) LKW auf 1000 mg/kWh und für Euro 5 (2000 mg/kWh) LKW auf 3000 mg/kWh festgelegt. Hier ist die Wahrscheinlichkeit von falsch positiv identifizierten Hochemittenten erfahrungsgemäß sehr gering. Diese Werte könnten auch für Stadtbusse verwendet werden. Die Frage der Ursache der Überschreitung bleibt davon jedoch unberührt und muss durch eine technische Überprüfung ermittelt werden. (DUH, S. Annen, R. Helmerich, 2020)



6 Literaturverzeichnis

AirYX, Dr. Denis Pöhler. (2020). *Heavy Duty Vehicle (HDV) NOx emission measurement with mobile remote sensing (Plume Chasing) and subsequent inspection of high emitters*. Dänemark: AirYX, Danish Road Traffic Authority.

DUH, (2019). *Interne Messungen der DUH*. Berlin, Randbezirke.

DUH, Dr. A. Friedrich, S. Annen, R. Helmerich. (2016 - 2021). *Emissions-Kontroll-Institut - Deutsche Umwelthilfe e.V.* Von <https://www.duh.de/projekte/eki-kontrollen/> abgerufen

DUH, S. Annen, R. Helmerich. (2020). *Bestimmung realer LKW NOx-Emissionen im Fahrbetrieb auf europäischen Autobahnen*. Europa: DUH.