

MFM-U RSD-MESSUNGEN ERSTFELD, PILOTPROJEKT



Abgasmessungen von Lastwagen mit Remote Sensing Detector

Altdorf, 02.10.2020

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)

inNET Monitoring AG

innet
Umweltmonitoring

Dätwylerstrasse 15 / CH-6460 Altdorf

T +41 41 500 50 40
info@innetag.ch
innetag.ch

IMPRESSUM

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt BAFU
Papiermühlestrasse 172
3063 Ittigen

Projektleitung:

Klaus Kammer
Bundesamt für Umwelt BAFU

Projektbearbeitung und Bericht:

Susanne Bieri
Mario Betschart
inNET Monitoring AG
Dätwylerstrasse 15
6460 Altdorf

Hinweis:

Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	- 3 -
2	Messmethodik.....	- 4 -
2.1	Remote Sensing Methodik	- 4 -
2.2	Kennzeichen	- 8 -
2.3	Standort.....	- 10 -
3	Resultate.....	- 12 -
3.1	Datenaufbereitung	- 12 -
3.2	Datenaufbereitung	- 13 -
3.3	NO Emissionen	- 14 -
3.4	Vergleich zu Grenzwerten und ähnlichen Studien	- 17 -
3.5	High Emitter finden	- 20 -
4	Schlussfolgerungen.....	- 20 -
5	Anhang	- 22 -
5.1	Messtage	- 23 -

1 Einleitung

Die Firma inNET Monitoring AG führte im Rahmen eines Pilotversuchs finanziert durch das MfM-U Projekts Messungen von Emissionen mittels RSD-System (Remote Sensing Detector) durch. Die Messungen fanden im Oktober 2019 statt. Mit RSD-Messungen können Schadstoffkonzentrationen in der Abgaswolke vorbeifahrender Fahrzeuge berührungslos gemessen werden. Gleichzeitig werden die Nummernschilder fotografisch erfasst, wodurch die Messwerte den technischen Fahrzeugdaten zugeordnet werden können. In der Schweiz werden in Zürich vom AWEL seit April 1997 mit dem RSD-Verfahren Messungen durchgeführt.¹ Weitere Projekte gab es kürzlich auch vom Lufthygieneamt beider Basel (Sommer 2018)² und dem ANU Graubünden (Sommer 2019)³. Alle diese Projekte zielen auf die Erfassung der Emissionen von Personen- und Lieferwagen ab. Gerade für das Projekt MfM-U ist aber eine Abschätzung des Emissionsverhaltens der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) – auch LKW genannt - interessant. Es gab bereits vor 25 Jahren ein Projekt, welches im Kanton Uri auf der Autobahn die Emissionen von schweren Motorfahrzeugen mit RSD-Messungen untersucht hat.⁴ In Europa laufen einige RSD-Messkampagnen mit SNF⁵, jedoch keine in der Schweiz.

Das MfM-U RSD Pilotprojekt setzt sich mit folgender Zielsetzung auseinander:

- Erfahrung und Machbarkeitsanalyse von RSD-Messungen bei SNF
- Wissensaufbau von RSD-Messungen bei SNF
- Optimierung der Messmethoden bei SNF
- Vergleich reale Emissionen mit Emissionsangaben von Fahrzeughersteller anhand kleiner Stichprobe

Der vorliegende Bericht fasst die Resultate des MfM-U RSD Pilotprojektes zusammen. Kapitel 2 erläutert dafür kurz die Messmethodik sowie die Umsetzung des Projektes. Dort werden somit die ersten drei Punkte der Zielsetzung abgehandelt. Kapitel 3 zeigt die Resultate der Messungen und der Vergleich mit Angaben von Fahrzeughersteller und in Kapitel 4 sind die Schlussfolgerungen zu finden.

¹ Sintermann et al. (2019): Langjährige Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing, Kanton Zürich / Baudirektion / Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

² Camenzind (2019): Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing (RSD), Resultate Messkampagne Basel 2018, Lufthygieneamt beider Basel

³ Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittels Remote Sensing (RSD) in Davos, 2019

⁴ Maly et al. (1998): Remote Sensing Messungen zur on-road Bestimmung der Abgase von schweren Motorfahrzeugen

⁵ The Danish Environmental Protection Agency (2018): Measurements of cheating with SCR catalysts on heavy duty vehicles, Environmental project No. 2021

2 Messmethodik

2.1 Remote Sensing Methodik

Mit RSD-Messungen kann die Schadstoffkonzentration in der Abgaswolke vorbeifahrender Fahrzeuge berührungslos gemessen werden. Dabei werden die Konzentrationen von NO, NO₂, NH₃, CO, CO₂ und VOC im Abgas der vorbeifahrenden Fahrzeuge gemessen. Unter Annahme des Treibstoffverbrauchs wird dann rechnerisch der Schadstoffausstoss, der für die Luftbelastung massgeblich ist, ermittelt. Zusätzlich werden neben den Schadstoffen die Geschwindigkeit und Beschleunigung gemessen, sowie das Nummernschild des Fahrzeugs fotografiert.

Abbildung 1 zeigt den theoretischen Messaufbau einer RSD-Messung. Mit einer Kamera werden die Bilder vom Fahrzeug erfasst. Zusätzlich werden die Geschwindigkeit und Beschleunigung mittels Messschiene am Boden gemessen. Das Hauptaugenmerk liegt aber auf der Lichtquelle, welche eine Lichtschranke durch Ultraviolett- und Infrarotquellen erzeugt, und dem Spektrometer. Die Schadstoffkonzentration wird durch die Absorption des Lichtes von verschiedenen Wellenlängen mit einem Spektrometer ermittelt. Im vorliegenden Projekt wurde der AccuScan™ RSD 5000 der spanischen Firma OPUS RSE (Madrid) eingesetzt.

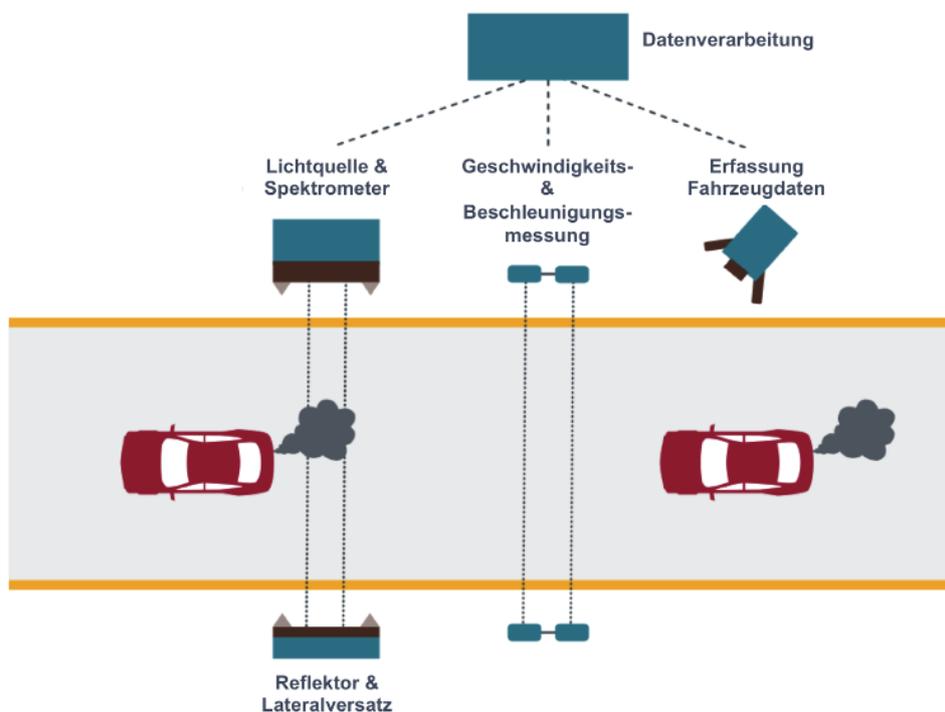


Abbildung 1: Messaufbau RSD-System⁶

⁶ https://awel.zh.ch/content/dam/baudirektion/awel/luft_asbest_elektrosmog/verkehr/rsd/dokumente/RSD_Bericht_2017.pdf [Stand: 25.09.2018]

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen das RSD-Messsystem im Einsatz beim MfM-U RSD Pilotprojekt im Schwerverkehrszentrum Ripshausen in Erstfeld.



Abbildung 2: Messaufbau RSD-System: Datenverarbeitung im Messfahrzeug, Lichtquelle und Spektrometer sowie auf der gegenüberliegenden Seite Reflektor und Lateralversatz sowie Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmessung.



Abbildung 3: Messaufbau RSD-System: Kamera zur Erfassung von Fahrzeugfrontseite inkl. Nummernschild.

Die Herausforderung bei LKW-Messungen liegt darin, dass sich die Auspuffe an verschiedenen Orten befinden können: hinten, oben, seitlich (in der Regel links) und unten. Beim Grossteil der LKW's (ca. > 90 %), welche in der Schweiz verkehren, ist der Auspuff seitlich oder unten angebracht. Mit der Anordnung der Messgeräte gemäss Abbildung 2 konnten die LKW's mit seitlichem oder untenliegendem Auspuff gut erfasst werden. Die meisten Auspuffanlagen liegen 20-40 cm über Boden. Aufgrund vorgängiger Abklärungen wurde für das Projekt eine Messhöhe von 35 cm festgelegt.

Die Videokamera wurde für das vorliegende Projekt so platziert, dass bei der Durchfahrt ein Standbild der Fahrzeugfront erfasst wurde. Eine Bilderkennungssoftware erkennt im Nachgang der Messungen (Postprocessing) die Kennzeichen auf den Nummernschildern und speichert diese in digitaler Form ab, siehe dazu auch Kapitel 2.2.

Etwa alle 1.5 Stunden ist bei laufendem Betrieb der Messgeräte eine Kalibration notwendig. Die Kalibration dauert ca. 45 Sekunden, für eine gültige Kalibration müssen drei Referenzmessungen in einer vorgegebenen Range liegen. Andernfalls muss das Kalibrationsverfahren wiederholt werden.

Abbildung 4 zeigt ein Beispiel eines Screenshots während einer aktiven RSD-Messung. Das grosse Bild zeigt den gemessenen LKW, die kleineren Bilder zeigen die vorher gemessenen 4 LKW's. Auf dem Bildschirm sind zudem die Schadstoff-Konzentrationen, die Stati der Messung sowie Informationen zu Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs ersichtlich.



Abbildung 4: Ein Beispiel eines Screenshots während einer aktiven RSD-Messung. Das grosse Bild zeigt den gemessenen LKW, die kleineren Bilder zeigen die vorher gemessenen 4 LKW's. Auf dem Bildschirm sind zudem die Messresultate und Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung ersichtlich.

Das RSD-Messgerät bestimmt die Konzentrationen in der Abgaswolke für CO₂, CO und HC durch IR-Absorption, für NO, NO₂ und NH₃ durch UV-Absorption. Mithilfe von zertifizierten Gasgemischen wird das RSD-System während der Messung mehrmals geprüft und kalibriert. Das Messgerät bestimmt nur für CO₂ die effektive Konzentration in der Abgaswolke, für alle anderen Schadstoffe wird eine Verhältniszahl zur gemessenen CO₂-Konzentration angegeben.⁷ Die Konzentrationen der Schadstoffe werden rechnerisch ermittelt. Mit der «Verbrennungsgleichung»⁸ können zudem die Konzentrationen in g/kg Kraftstoff umgerechnet werden. In der vorliegenden Studie wurden (angelehnt an die Studie von Spanien⁹) folgende Annahmen getroffen:

- Alle SNF fahren mit Diesel. Eine Dichte für Diesel von 0.81 kg/l wird angenommen.
- NO_x wird direkt aus NO berechnet ($NO_x = NO * (46/30)$).
- Für die Umformung der Konzentrationen zu «g/kg fuel burned» wird die «Verbrennungsgleichung» verwendet.

⁷ Sintermann et al. (2019): Langjährige Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittel Remote Sensing, Kanton Zürich / Baudirektion / Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

⁸ Bishop (2014): FEAT Equations for CO, HC and NO, last updated Feb. 2014

⁹ Buhigas et al. (2019): Finding NO_x-cheaters on the spot with Remote Sensing Devices, 23rd Transport and Air Pollution Conference, Thessaloniki 2019

Die Nachbearbeitung der Messung sah folgendermassen aus:

- Jeder Messtag wurde als zip-File an die Firma OPUS RSE übermittelt. Das zip-File enthielt die gemessenen Messwerte vom RSD sowie die dazugehörigen automatisch erfassten Fahrzeugbilder dieses Messtags [RAW Data].
- OPUS RSE erstellte danach pro Messtag eine MDB-Datei, bei welcher mit der automatischen Bilderkennung die Nummernschilder den Messwerten zugeordnet wurden [ALPR Data].
- Mithilfe eines TagEditors und den Fotos mussten die Nummernschilder nachträglich manuell kontrolliert und wenn nötig angepasst werden [TAG_EDITED Data].
- Nach dieser manuellen Anpassung machte OPUS RSE die Endbereinigung und erstellte eine CSV-Datei mit allen Informationen der Messung [FINAL RSD Files].
- Diese finalen Daten wurden von inNET Monitoring AG in die Swiss RSD-Datenbank eingelesen. In dieser Datenbank sind zudem die Euroklasse-Informationen zu den Nummernschildern enthalten. Die nachfolgenden Auswertungen (siehe Kapitel 3) erfolgten mittels Matlab.

2.2 Kennzeichen

Wie bereits im vorherigen Kapitel 2.1 erläutert, wurde mithilfe eines TagEditors und den erfassten Fotos die automatisch erkannten Nummernkennzeichen durchgescannt und wo falsch erkannt manuell angepasst. Diese Arbeit wurde, wenn immer möglich, im laufenden Betrieb durchgeführt. Die Erfahrung zeigte, dass die automatische Bilderkennung grundsätzlich gut funktionierte. Einzig frühmorgens oder spätabends führten die dunkleren Lichtverhältnisse zu falschen Nummernkennzeichen. Von den insgesamt 4'194 gültigen Messungen stimmte die automatische Bilderkennung bei 402 Fällen (10 %) nicht. Dabei wurde in 206 Fällen gar kein Nummernschild erkannt, und in 196 Fällen das Nummernschild falsch erkannt.

Speed	Accel	Flag	CO	CO2	HC	NO	Smoke	MaxCO2	Samples	Status
10.34	-0.68	V	0.19	14.87	186	368	-0.78	10.03	3	I

Abbildung 5: Beispielbild einer Messung, morgens, bei welcher die automatische Kennzeichenzuordnung nicht erfolgreich war. Für die Anonymisierung wurde das Nummernschild nachträglich mit einem schwarzen Balken unkenntlich gemacht.

Von der eidgenössischen Zollverwaltung wurden die Kennzeichen der inländischen und ausländischen Fahrzeuge für das vorliegende Projekt zur Verfügung gestellt, inklusive zugehöriger Informationen über die fahrzeugspezifische Abgasnorm (Euroklassen). Auf den Miteinbezug weiterer Fahrzeuginformationen (z. B. Alter, Marke) wurde in diesem Pilotprojekt verzichtet. Die validierten Kennzeichen wurden in einem zweiten Schritt mit den Informationen der eidgenössischen Zollverwaltung verglichen. Nach diesem zweiten Schritt konnten total 191 Messungen keiner Euroklasse zugeordnet werden. Teilweise kann das darauf zurückzuführen sein, dass auch mittels manueller Nachbearbeitung das Kennzeichen falsch erkannt wurde. Hierfür wurde mit einem dritten Schritt Abhilfe geschaffen: In den untenstehenden Fällen wurde versucht dennoch ein gültiges Kennzeichen, welches in der Liste der eidgenössischen Zollverwaltung enthalten war, zu generieren.

- Statt Buchstabe O, die Zahl 0 im Kennzeichen
- Statt Buchstabe Y, den Buchstaben V im Kennzeichen
- Statt Buchstabe C, den Buchstaben G im Kennzeichen

Diese Anpassung führte schlussendlich dazu, dass nur noch 188 Messungen nicht mehr zugeordnet werden konnten.

Zusätzlich wurde durch die manuelle Nachprüfung der Kennzeichen mit Hilfe des TagEditors für jedes Kennzeichen die eindeutige Länderkennzeichnung notiert. Für die eigentliche Auswertung erwies sich diese Zusatzinformation als sehr nützlich. Für ein allfälliges Folgeprojekt ist diese manuelle Erfassung

der Länderkennzeichnung aber nicht zwingend notwendig. Die Information ist jeweils im fotografierten Nummernschild enthalten und könnte im Zweifel jederzeit hergeleitet werden (vorausgesetzt, die Fotos werden nicht gelöscht).

2.3 Standort

Für gute Messresultate ist die richtige Standortwahl entscheidend. Folgende Kriterien müssen erfüllt werden:

- Relativ tiefe Geschwindigkeit von ca. 50 km/h (optimalerweise zwischen 40-70 km/h)¹⁰
- Einspurige Strasse oder Mittelinsel
- Fahrt unter Last
- Genügend Platz für die Messgeräte sowie das dazugehörige Messfahrzeug
- Die Verkehrssicherheit und die Sicherheit der Messtechniker müssen jederzeit gewährleistet sein.
- Stromanschluss

In den Vorüberlegungen für das Pilotprojekt konnten einige mögliche Standorte ausgeschlossen werden (zu hohe Geschwindigkeit, zu wenig Platz). Schlussendlich wurde das Schwerverkehrskontrollzentrum (SVZ) Ripshausen für das Pilotprojekt ausgewählt. Das SVZ Ripshausen ist das grösste SVZ in der Schweiz, mit einem durchschnittlichen Verkehrsaufkommen von ca. 1'200 SNF pro Tag. Die höchsten Frequenzen werden zwischen 6 bis 8 Uhr morgens und zwischen 17 und 19 Uhr abends erreicht. Im SVZ Ripshausen wurde ein Standort beim Losfahren der SNF aus dem Warteraum gewählt. Es stand genügend Platz für die Messgeräte zur Verfügung und die SNF fuhren unter Last. Einziger Nachteil war, dass angenommen werden muss, dass bei manchen Fahrzeugen die DeNOx-Systeme nicht auf optimaler Betriebstemperatur liefen, da diese relativ rasch abkühlen. Bei einem möglichen Nachfolgeprojekt sollte dieser Nachteil bei der Standortwahl berücksichtigt werden (Fahrzeuge sollten schon vorher bedeutend unter Last fahren).

Der gewählte Standort ist in Abbildung 2 und Abbildung 3 ersichtlich, Abbildung 6 zeigt die geographische Übersichtskarte mit dem roten Punkt als Standort.

¹⁰ RSD 5000 Operator Manual: RSD 5000 Nextgen Operators Manual RSD-MAN-2014-1015 Version 3.0



Abbildung 6: Geographische Übersichtskarte, in rot der gewählte Standort für das Pilotprojekt

3 Resultate

Vorliegendes Kapitel wertet die Ergebnisse aus, welche während dem Messmonat des Pilotprojektes gesammelt wurden. Im Anhang Kapitel 5.1 ist eine Zusammenfassung der Messtage zu finden mit den Witterungsverhältnissen sowie Besonderheiten der Messtechnik. Insgesamt wurden während 16 Messtagen total 10'928 Fahrzeuge gemessen. Aufgrund der höchsten Frequenzen im SVZ Ripshausen morgens und abends wurden Messtage von 06:00 bis 19:00 Uhr angestrebt. Die Messung wurde in eine Vormittags- und Nachmittagsschicht unterteilt während denen jeweils ein Messtechniker vor Ort war.

3.1 Datenaufbereitung

Total wurden 10'928 Fahrzeuge gemessen. Damit eine Messung als gültig klassifiziert wurde, mussten folgende Voraussetzungen (die Begriffe beziehen sich auf interne Benennungen in der Swiss RSD-Datenbank) erfüllt sein (in Anlehnung an die Analyse von Zürich¹¹ und Dänemark¹²):

- Nummernschild mit Kennzeichen vorhanden
- Qualitätsflags aller Schadstoffe einer Messung müssen gültig sein (VDRAAllGasValid = V, AuditStatus = G, S_A_Flag = V)
- ValidPlumePoints > 0
- LLR_NO < 2
- $0 < \text{Vehicle Speed Power (VSP)} < 20$

Von den 10'928 vermessenen Fahrzeugen waren nach den oben aufgelisteten Voraussetzungen 4'194 gültige Messungen. Davon konnte bei 188 Fahrzeuge keine gültige Kennzeichen-Zuweisung und Euroklasse hergeleitet werden (siehe Kapitel 2.2). Von den somit total 4'006 Fahrzeuge mit korrekter Kennzeichen-Zuweisung sind 17 % inländische und 83 % ausländische SNF. Auf eine weitere Unterteilung in die Länder wird aufgrund der geringen Anzahl der nicht möglichen weiterführenden statistischen Analysen verzichtet. Abbildung 7 zeigt als Übersicht die Unterteilung der SNF in die Euroklassen. 91.7 % der gemessenen SNF waren Euro VI, 7.8 % Euro V, und im <1-Prozentbereich Euro III (14 SNF) und Euro IV (4 SNF). Diese Unterteilung bleibt sich ähnlich, wenn nur die inländischen SNF betrachtet werden (85 % Euro VI, 14 % Euro V).

¹¹ Sintermann et al. (2019): Langjährige Abgasmessungen im realen Fahrbetrieb mittel Remote Sensing, Kanton Zürich / Baudirektion / Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

¹² The Danish Environmental Protection Agency (2018): Measurements of cheating with SCR catalysts on heavy duty vehicles, Environmental project No. 2021

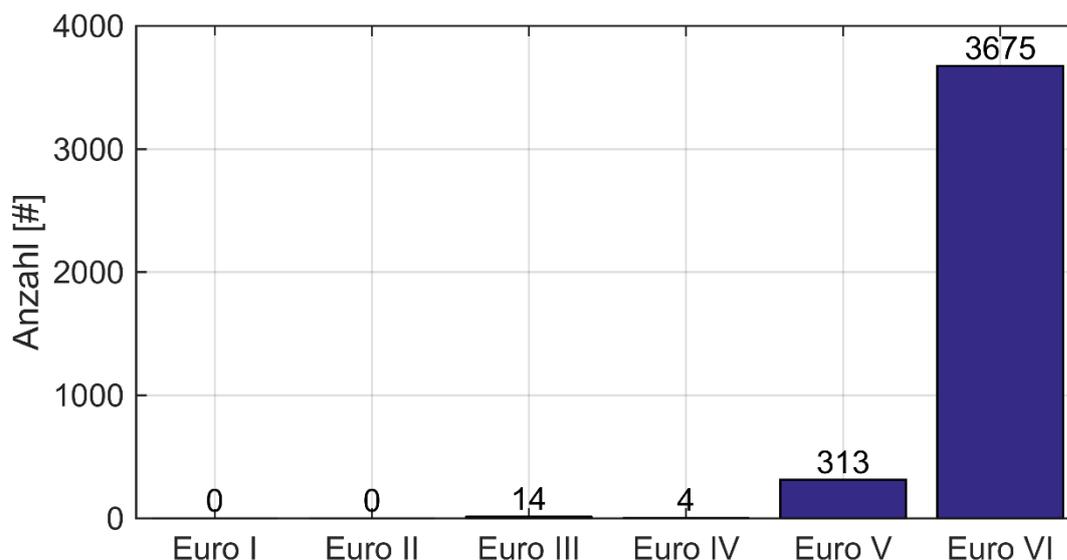


Abbildung 7: Anzahl gemessener SNF pro Euroklasse

Weitere Informationen der SNF (z. B. Alter, Marke, SCR-Katalysator etc.) standen für dieses Pilotprojekt nicht zur Verfügung. Es gilt zu klären, ob die Daten für weiterführende Projekte zur Verfügung stünden.

3.2 Datenaufbereitung

Um Messresultate genauer interpretieren zu können ist es von Nutzen, Kenntnis über die Messunsicherheit zu haben. In einem RSD-Projekt in Dänemark wurden zwei RSD-Geräte (RSD4600 und RSD5000) parallel betrieben, um Kenntnis über die Messunsicherheit zu bekommen. Es wurden insgesamt 134 SNF parallel gemessen. Allgemein war die Übereinstimmung der Resultate gut, allerdings gab es zum Teil auch sehr grosse Unterschiede.¹³ Je mehr Fahrzeuge gemessen werden, desto genauere Aussagen hinsichtlich Statistik kann gemacht werden. Das vorliegende Projekt war ein Pilotprojekt und sollte vor allem hinsichtlich Machbarkeitsanalyse und Messmethodik Antworten liefern, die vorliegenden Auswertungen der Messergebnisse sind auch hinsichtlich der kleinen Stichprobe mit Vorsicht zu geniessen.

¹³The Danish Environmental Protection Agency (2018): Measurements of cheating with SCR catalysts on heavy duty vehicles, Environmental project No. 2021

3.3 NO Emissionen

Das RSD-Messgerät bestimmt automatisch die Konzentrationen in Verhältnisse (NO/CO₂) und in ppm. Alle weiteren Annahmen und Berechnungen sind im Kapitel 2.1 zu finden.

Die mittleren gemessenen NO- und NO_x-Emissionen der SNF sind in Tabelle 1 aufgelistet. Gleichzeitig wurde in Tabelle 1 auch die Emissionen zweier Studien in Spanien und Dänemark zum Vergleich aufgeführt. Auf diese zwei Studien wird im Detail unter Kapitel 3.4 eingegangen. Diese zwei erwähnten Studien haben im Vergleich zur diesem Pilotprojekt einen relativ hohen Anteil an «Euro V»-SNF.

Tabelle 1: Vergleich der mittleren NO- und NO_x-Emissionen der gemessenen SNF von diesem Pilotprojekt, sowie einer Studie aus Spanien und Dänemark

	Anzahl SNF	NO/CO ₂ (ppm/%)	NO (ppm)	NO (g/kg)	NO _x (g/kg)	NO (g/l)	NO _x (g/l)
MfM-U Pilot-studie	4'006	21.41	319.42	4.55	9.94	3.69	8.05
Studie Spanien¹⁴	1'192	39.09	582.75	8.22	12.61	6.66	12.22
Studie Dänemark¹⁵	874			9.40			

Abbildung 8 zeigt die durchschnittlichen NO-Emissionen in g/kg unterteilt nach Euroklassen. Zusätzlich ist in der Grafik der prozentuale Anteil der jeweiligen Euroklassen am Gesamttotal der gemessenen SNF ersichtlich. Die NO-Emissionen der Euroklassen III bis V sind sehr ähnlich, bei Euro VI ergibt sich eine deutliche Reduktion. Werden die durchschnittlichen NO-Emissionen als Boxplot dargestellt, wird die Verteilung der einzelnen Messungen ersichtlich. Bei der Darstellung eines Boxplots steht die rote Querlinie für den Median, die blauen Boxen für 50 % aller Messungen und die schwarzen Balken für die Messungen ohne Ausreisser. Abbildung 9 zeigt die Boxplots für alle validierten Messungen («Gesamt»), für alle validierten Messungen mit CH-Kennzeichen («CH») und für alle validierten Messungen mit ausländischem Kennzeichen («AUSL»). Der Median der NO-Emissionen liegt gesamthaft bei 1.5 g/kg, 50 % aller Messungen in einem Bereich zwischen 0.5 g/kg bis 5.5 g/kg. Bei der Unterteilung in inländische und ausländische Fahrzeuge ist zudem ersichtlich, dass der Median der inländischen Fahrzeuge leicht geringer ist. Es wurden aber deutlich weniger inländische Fahrzeuge gemessen (17 % inländische versus 83 % ausländische SNF).

¹⁴ Buhigas et al. (2019): Finding NO_x-cheaters on the spot with Remote Sensing Devices, 23rd Transport and Air Pollution Conference, Thessaloniki 2019

¹⁵ Ellermann et al. (2018): Measurements of cheating with SCR catalysts on heavy duty vehicles, Environmental project No. 2021, The Danish Environmental Protection Agency

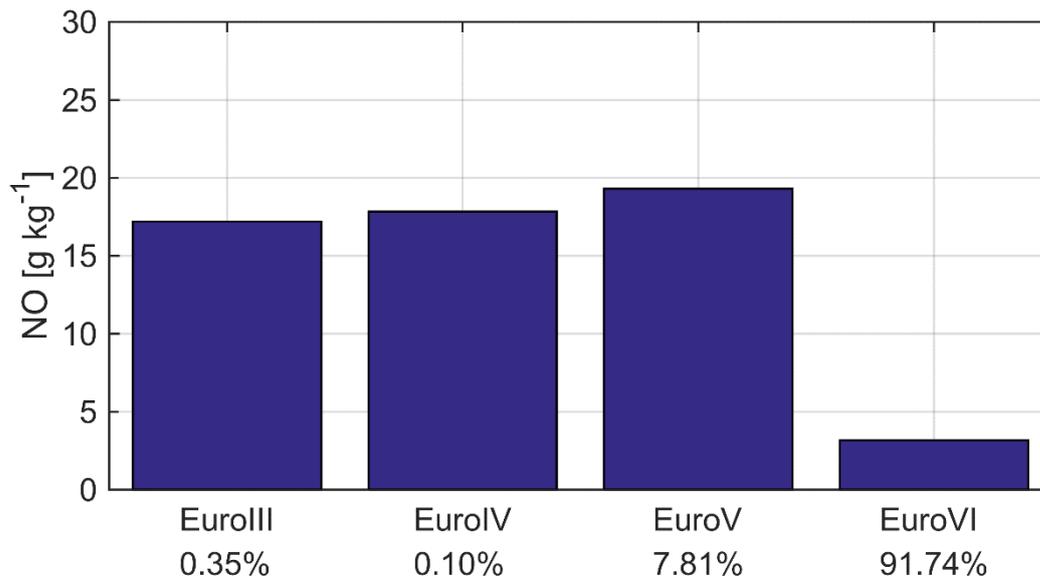


Abbildung 8: Durchschnittliche NO-Emissionen (g/kg) unterteilt nach Euro Standard, inkl. Anzahl der Messungen in Prozent

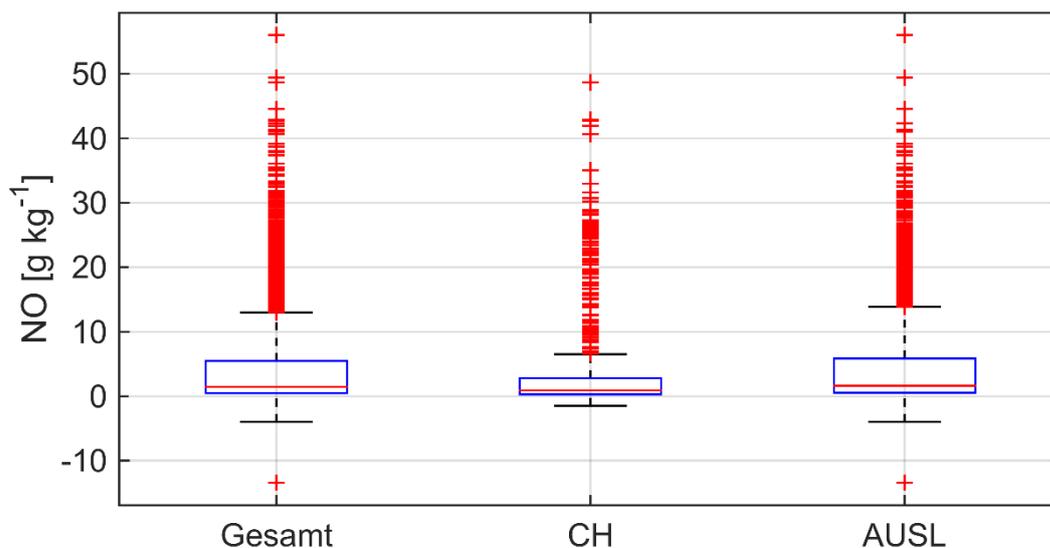


Abbildung 9: Boxplot der NO-Emissionen (g/kg), unterteilt in «Gesamt» (alle validierten Messungen), «CH» (alle validierten Messungen mit CH-Kennzeichen) und «AUSL» (alle validierten Messungen mit ausländischem Kennzeichen).

Interessant ist auch die Unterteilung nach Euroklassen in der Boxplot-Darstellung (Abbildung 10). Bei den Euroklassen III bis V ergibt sich eine deutlich grössere Spannweite der Messungen, wohingegen die NO-Emissionen der «Euro VI»-SNF eine geringere Bandbreite aufweisen. Allerdings sind aufgrund der Fülle der Messungen der Euro VI-SNF auch viele Ausreisser erkennbar.

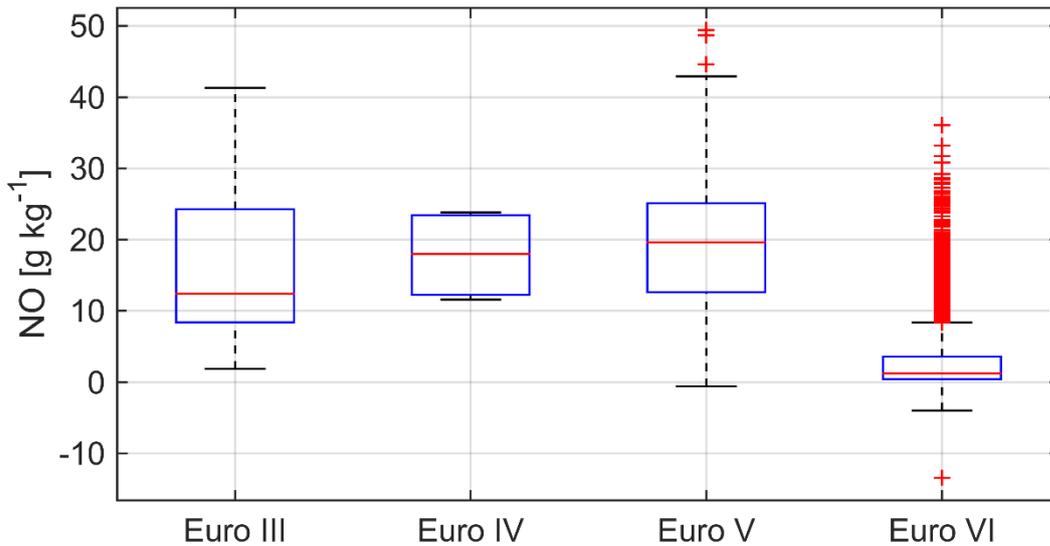


Abbildung 10: Boxplot der durchschnittlichen NO-Emissionen (g/kg) unterteilt nach Euro-Standard

Abbildung 11 zeigt schlussendlich die NO-Emissionen in g/kg geordnet von der tiefsten bis zur höchsten NO-Emission dargestellt als prozentuale Anzahl der Messungen für alle Euro V (blau) und Euro VI (orange) Fahrzeuge. Mit dieser Darstellung wird ersichtlich, wieviel Prozent der Messungen unter oder über einem bestimmten NO-Emissionslevel sind. Deutlich ist der Unterschied zwischen der «Euro V»-SNF und «Euro VI»-SNF ersichtlich: Nur 20 % der Messungen bei «Euro V»-SNF liegen unter 10 g/kg NO, wohingegen dies «Euro VI»-SNF bei ca. 90 % der Fahrzeuge der Fall ist.

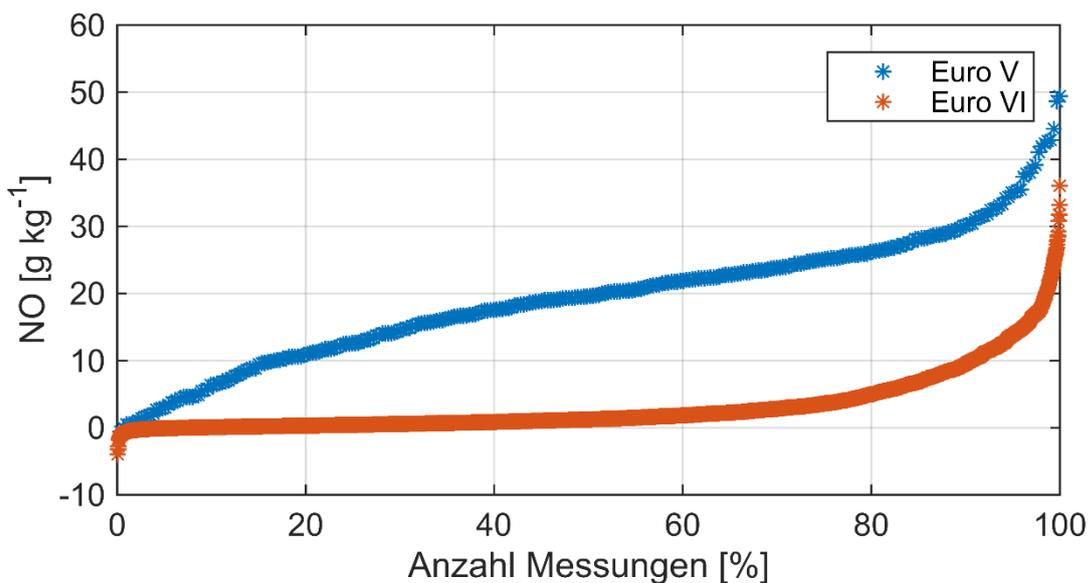


Abbildung 11: NO-Emissionen in g/kg geordnet von der tiefsten zur höchsten Messung, dargestellt als prozentuale Anzahl der Messungen für alle Euro V (blau) und Euro VI (orange) SNF.

3.4 Vergleich zu Grenzwerten und ähnlichen Studien

Seit 1995 übernimmt die Schweiz die nationalen Abgasvorschriften von der jeweils entsprechenden EU-Richtlinien. Es gelten Grenzwerte für CO, NO_x, Kohlenwasserstoffe (C_nH_m), Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN). Die Grenzwerte unterscheiden sich dabei nach der Art des Motors (Otto- oder Dieselmotor) sowie Fahrzeugtyp (z. B. PKW oder LKW). Die jeweiligen Grenzwerte sind in Tabelle 2 ersichtlich.¹⁶

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte für schwere Motorwagen unterteilt in Diesel- und Gasmotoren sowie der einzelnen Parameter

Norm/ Etappe	Inkraft- treten ^a	Prüfzyklus	Grenzwerte							
			CO [g/kWh]	THC [g/kWh]	NMHC [g/kWh]	CH ₄ [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	NH ₃ [ppm]	PM [g/kWh]	PN [#/kWh]
FAV 2										
FAV 2-1	10.1987	ECE 49	8.40	2.10	-	-	14.4	-	-	-
FAV 2-2	10.1991	ECE 49	4.90	1.23	-	-	9.0	-	0.70	-
FAV 2-3	10.1992/93	ECE 49	4.90	1.23	-	-	9.0	-	0.40	-
TAFV 1										
EURO II	10.1995/96	ECE 49	4.00	1.10	-	-	7.0	-	0.15	-
Kompressionszündungsmotoren (Dieselmotoren):										
EURO III	10.2000/01	ESC/ETC ^b	2.1/5.45	0.66/-	-/0.78	-/-	5.0/5.0	-/-	0.10/0.16	-/-
EURO IV	10.2005/06	ESC/ETC	1.5/4.00	0.46/-	-/0.55	-/-	3.5/3.5	-/-	0.02/0.03	-/-
EURO V	10.2008/09	ESC/ETC	1.5/4.00	0.46/-	-/0.55	-/-	2.0/2.0	-/-	0.02/0.03	-/-
EEV ^c	-	ESC/ETC	1.5/3.00	0.25/-	-/0.40	-/-	2.0/2.0	-/-	0.02/0.02	-/-
EURO VI	01.2013/14	WHSC/ WHTC	1.5/4.00	0.13/0.16	-/-	-/-	0.40/0.46	10/10	0.01/0.01	8.0x10 ¹¹ / 6.0x10 ¹¹
Fremdzündungsmotoren (Gasmotoren):										
EURO III	10.2000/01	ETC	5.45	-	0.78	1.60	5.0	-	-	-
EURO IV	10.2005/06	ETC	4.00	-	0.55	1.10	3.5	-	-	-
EURO V	10.2008/09	ETC	4.00	-	0.55	1.10	2.0	-	-	-
EEV ^c	-	ETC	3.00	-	0.40	0.65	2.0	-	0.02	-
EURO VI	01.2013/14	WHTC	4.00	-	0.16	0.50	0.46	10	0.01	^d

^a Erster Termin: Gültig für neue Fahrzeugtypen. Zweiter Termin: Gültig für die 1. Inverkehrsetzung von Neufahrzeugen.
^b Nur für Kompressionszündungsmotoren mit Partikelfilter und/oder DeNO_x-Katalysator.
^c Enhanced Environmentally friendly Vehicle (besonders umweltfreundliche Fahrzeuge).
^d Ein Partikel-Anzahl-Grenzwert für Gasmotoren wird zu einem späteren Zeitpunkt festgelegt.

¹⁶ BAFU (2019): Entwicklung der schweizerischen Gesetzgebung im Bereich der Abgasemissionen von Motorfahrzeuge und Maschinen

Die Grenzwerte der schweren Nutzfahrzeuge werden in g/kWh angegeben, wohingegen mit dem RSD-Messgerät die Emissionen als Konzentrationen (Verhältnisse oder ppm) angegeben werden. In der Studie von Spanien¹⁷ wurden die Grenzwerte in ppm umgerechnet (siehe Tabelle 3).

Abbildung 12 zeigt die durchschnittlichen NO-Emissionen in ppm aufgeteilt nach Euroklassen sowie zusätzlich als rote Linie der umgerechnete und entsprechend hergeleitete NO-Grenzwert in ppm gemäss der Studie in Spanien.¹⁷ Diese Darstellung hat vergleichenden Charakter, um die gemessenen Werte einzuordnen. Zu beachten ist, dass die Variabilität einer RSD-Messung generell gross ist. Eine einzelne Messung mit einem hohen Wert lässt grundsätzlich noch nicht darauf schliessen, dass dieses Fahrzeug oder dieses Modell Emissionen über dem Grenzwert verursacht. Viele Messungen sind nötig, um genaue Aussagen zu machen. Ausserdem entspricht die Fahrsituation (z. B. Geschwindigkeit) am Messstandort natürlich nicht der in einem Testzyklus.

Tabelle 3: NO- und NOx-Emissionen umgerechnet gemäss Studie aus Spanien¹⁷

	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
NOx (g/kWh)	9	7	5	3.5	2	0.4
NO (ppm)	1'965	1'530	1'096	770	444	96

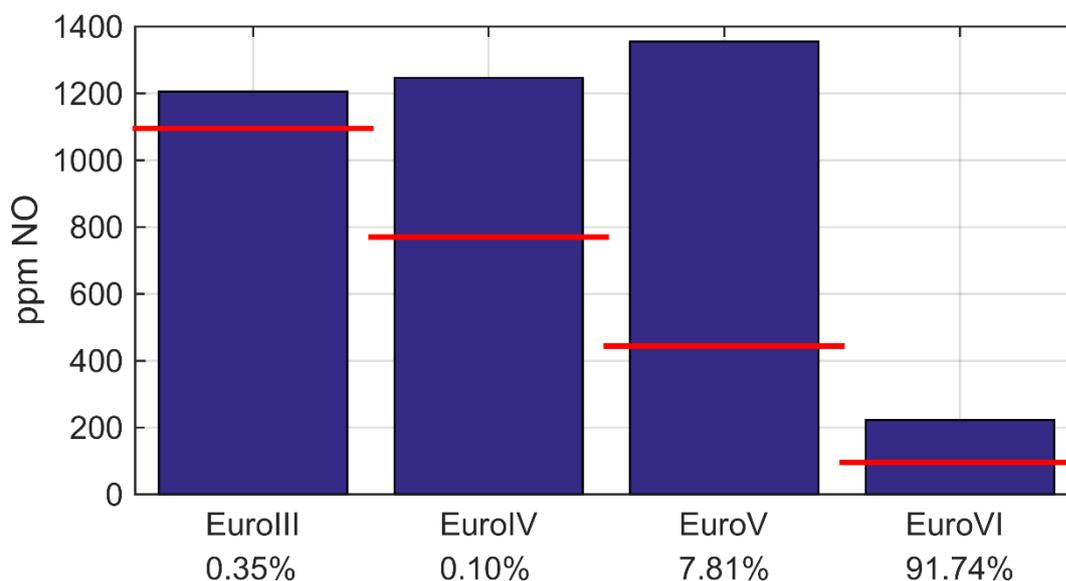


Abbildung 12: Durchschnittliche NO-Emissionen in ppm aufgeteilt nach Euro Standard, inkl. Anzahl der Messungen in Prozent sowie als rote Linie der umgerechnete NO-Grenzwert in ppm

¹⁷ Buhigas et al. (2019): Finding NOx-cheaters on the spot with Remote Sensing Devices, 23rd Transport and Air Pollution Conference, Thessaloniki 2019

Werden die vorliegenden Ergebnisse mit den bereits häufig zitierten zwei Studien aus Spanien und Dänemark verglichen (siehe auch Tabelle 1) zeigen sich sehr ähnliche Resultate und Schlussfolgerungen, allerdings auch einige Unterschiede:

- Das Setting aller drei Studien ist sehr vergleichbar, die Messungen der vorliegenden Pilotstudie sowie derjenigen in Spanien wurde in einem Schwerverkehrszentrum durchgeführt, diejenige von Dänemark auf Auffahrten zur Autobahn.
- In der vorliegenden Pilotstudie konnten mit 4'006 Fahrzeuge eine grosse Anzahl Fahrzeuge gemessen werden.
- Beide Studien aus Spanien und Dänemark waren auf «High Emitter» ausgelegt, der Vergleich der totalen NO-Emissionen ist somit nicht zulässig.
- Die Aufteilung der Euroklassen ist bei der Pilotstudie am deutlichsten ausgeprägt (mit > 85 % Euro VI), die Studien in Dänemark und Spanien hatten beide einen relativ hohen Anteil «Euro V»-SNF (Spanien 31 %, Dänemark 30 %)
- In der Dänemark-Studie sind die Emissionen der «Euro VI»-SNF 10-mal tiefer als diejenigen der «Euro V»-Fahrzeuge, bei der vorliegenden Pilotstudie liegt dieser Faktor bei ca. 5.
- Insbesondere die Verteilung der NO-Emissionen von der tiefsten zur höchsten Messungen unterteilt in Euro V und Euro VI ist bei der Studie in Dänemark und der vorliegenden Pilotstudie sehr ähnlich (Vergleich Tabelle 2 und Abbildung 13).

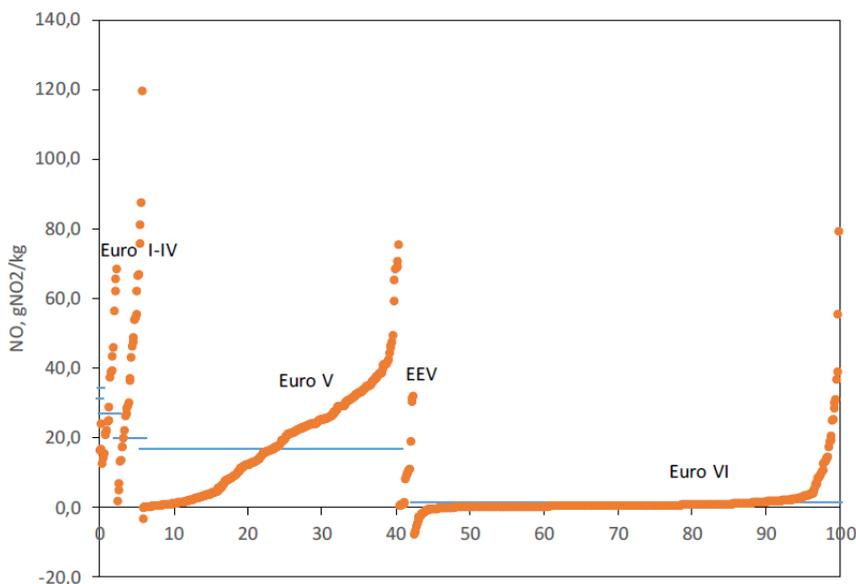


Abbildung 13: Verteilung der NO-Emissionen in g/kg geordnet zuerst nach den Euroklassen und zweites von der tiefsten zur höchsten Messung. Die blauen Linien zeigen die DCE¹⁸-Emissionsfaktoren für die verschiedenen Euro Standards (aus der Studie von Dänemark)¹⁹.

¹⁸ DCE: Danisch Center for Environment and Energi

3.5 High Emitter finden

Während der Laufzeit des Pilotprojektes wurde entschieden, dass an 2 Tagen zusammen mit der Polizei versucht wird, in Echtzeit SNF mit erhöhten Emissionen herauszupicken (High Emitter). Für eine möglichst hohe Anzahl von gültigen Werten und einem Setting gleich wie in anderen RSD-Projekten in Europa¹⁹, wurde der Standort innerhalb des SVZ Ripshausen verschoben. So konnten die SNF mit Pylonen auf eine Spur geleitet und die Chauffeure angehalten werden Vollgas zu geben und auf 50 km/h zu beschleunigen. Es wurde entschieden, bei einem Schwellwert von 1'800 ppm NO die SNF von der Polizei kontrollieren zu lassen. Der Wert wurde bewusst sehr hoch angelegt, um falsch verdächtige Fahrzeuge möglichst zu eliminieren.²⁰ Es zeigte sich während der Durchführung, dass nur wenige SNF über 1'800 ppm NO ausstiessen. Ausserdem fehlte es teils an einer sauberen Durchführung (Kommunikationsprobleme, Performance-Unterschiede). Deshalb wurde in der vorliegenden Auswertung auf eine detailliertere Auswertung dieser 2 Tage verzichtet. Für die Zukunft muss ein solches Setting aber in Betracht gezogen werden, dabei sollen zusätzlich weitere Daten zu den schweren Nutzfahrzeugen gesammelt werden (z. B. Alter, Marke, SCR Katalyst). Es konnte aber gezeigt werden, dass mit gezieltem Beschleunigen unter Last die Gültigkeit der Messwerte deutlich gesteigert werden konnte. Es wurden bei dem Setup zeitweise 9 von 10 Fahrzeugen gültig vermessen. Die Rate war ansonsten einiges geringer.

4 Schlussfolgerungen

Das vorliegende MfM-U RSD-Pilotprojekt hat sich mit der Zielsetzung der Messmethodik zur Messung von RSD und SNF sowie dem Vergleich der realen Emissionen der SNF auseinandergesetzt. Die Schlussfolgerungen können in einen Teil «Messmethodik» und «Resultate» unterteilt werden:

Messmethodik:

Das RSD-Messgerät konnte **erfolgreich** für die Messung der SNF eingesetzt werden. Dafür benötigte es keinen zusätzlichen messtechnischen Effort, es musste die richtige Platzierung und der optimale Standort geachtet werden. Die Messung erfordert einen **hohen Personalaufwand**, allerdings kann diese Zeit vor Ort für die **manuelle Validierung** der Messergebnisse und Nummernschilder genutzt werden. Die Messungen und deren Gültigkeit sind **stark witterungsabhängig**. Insgesamt ist das RSD-Gerät **sehr gut bedienbar**, lief allerdings **teilweise instabil**.

Resultate:

Gemäss der erhobenen Stichprobe ist ersichtlich, dass im **grenzquerenden Güterverkehr** durch den schweizerischen Alpenraum **viele Euro VI Fahrzeuge** unterwegs sind. Emissionstechnisch zeigt sich eine **deutliche Verbesserung der NO-Emissionen bei Euro VI Fahrzeuge** im Vergleich zu Euro V Fahrzeuge. Einen Vergleich zu Emissions-Grenzwerten ist schwierig und kann nur indirekt gemacht werden.

¹⁹ Ellermann et al. (2018): Measurements of cheating with SCR catalysts on heavy duty vehicles, Environmental project No. 2021, The Danish Environmental Protection Agency

²⁰ Als Vergleich: In der Studie von Spanien (Buhigas et al. (2019)) lag dieser Wert bei 1000 ppm NO.

Ein Vergleich zu **ähnlichen Studien aus dem Ausland** zeigt aber sehr **vergleichbare Resultate**. Erfreulich ist in der vorliegenden MfM-U RSD-Pilotstudie die **hohe Anzahl gültiger Messungen**.

Gesamtheitlich betrachtet, kann trotz der kurzen Messdauer von einem sehr erfolgreichen Pilotprojekt gesprochen werden. Kausale Zusammenhänge zwischen den Emissionen der verschiedenen Euroklassen konnten aufgezeigt werden und die Messmethodik würde es erlauben HighEmitter während der Vorbeifahrt zu detektieren.

Dank des MfM-U Projektes konnte gezeigt werden, dass mit dem RSD-Verfahren auch die Abgase von schweren Nutzfahrzeugen gemessen werden können. Dies als Ergänzung zu den langjährigen Messungen von Personenwagen im Mittelland (Zürich und Basel) und Messungen in höheren Lagen (Davos).

5 Anhang

5.1 Messtage

Tabelle 4: Übersicht der Messtage inkl. Witterung und Besonderheiten der Messtechnik

Messtag	Datum	Witterung	Anzahl gemessene Fahrzeuge, davon gültig	Besonderheiten Messtechnik
1	03.10.2019		642, 84	Einführungstage mit OPUS RSE
2	04.10.2019		128, 45	Einführungstage mit OPUS RSE
3	07.10.2019 06:00-19:30	Sonnig, Strasse teilweise nass	981, 333	Eindunkeln ab 19:00 Uhr, aufgrund schwarz-weiss Bilder Nummernerkennung schlecht, Einstellung Kamera geändert Ab 19:20 Uhr blenden Scheinwerfer
4	08.10.2019 06:00-19:30	Leicht bedeckt	399, 172	Audits werden weniger oft gemacht (Gasverbrauch sehr hoch und nicht unbedingt notwendig) System muss ein- bis zweimal am Tag neu gestartet werden wegen unerklärlichem Software Verhalten
5	09.10.2019 06:00-12:00	Bedeckt, Regen vorhergesagt	418, 153	Ab 10:00 leichter Regen, immer wieder Messunterbruch, Gerätschaften mit Plache geschützt
6	10.10.2019 06:00-18:30	Teilweise bedeckt	1075, 531	
7	11.10.2019 06:00-19:15	Klar, sonnig	986, 488	
8	14.10.2019 06:00-14:00	Klar, sonnig	546, 190	Teilweise unerklärliche Probleme mit dem Messprogramm
9	15.10.2019 06:00-13:00	Teilweise klar, teilweise bedeckt, Föhn	560, 189	

10	16.10.2019 06:00-18:30	Anfänglich teilweise bedeckt, später sonnig und klar	1'010, 309	Nachmittagsschicht High Emitter
11	17.10.2019	Sonnig bis wenig bewölkt	306, 135	High Emitter, teilweise Ausfall RSD
12	18.10.2019 09:00-16:00		507, 223	RSD läuft wieder Halbe Stunde Speedbar leicht verschoben, was zu falscher Beschleunigung führte
13	22.10.2019 06:00-18:30	Bedeckt, Strasse nass	1030, 521	
14	23.10.2019 06:00-16:00	Klar, Föhnsturm	897, 215	Viele Messungen haben wegen dem starken Wind ungültige Gaswerte. Nur ca. 25% gültige Messungen
15	24.10.2019 06:00-17:30	Teils sonnig, Föhnlage	894, 346	Teilweise wiederholt Softwareabstürze
16	25.10.2019 09:00-15:30	Teils klar	549, 259	

