

# Emissionsvergleich verschiedener Antriebsarten in aktuellen Personenwagen

Untersuchung der Emissionen von aktuellen Personenwagen mit konventionellen und direkt eingespritzten Benzinmotoren, Dieselmotoren mit und ohne Partikelfilter, sowie Erdgasmotoren



Version 1. November 2007

**Danksagung:**

Die Empa dankt dem BAFU und Novatlantis – „Nachhaltigkeit im ETH-Bereich“ für finanzielle Beiträge zur Durchführung der Vergleichsstudie:

*Bundesamt für Umwelt BAFU*

Abteilung Luftreinhaltung und NIS

Sektion Verkehr

Worbentalstrasse 68, 3063 Ittigen, Postadresse: 3003 Bern

Tel +41 31 322 93 40

*Novatlantis – Nachhaltigkeit im ETH-Bereich*

c/o EAWAG

Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf

Tel. +41 44 305 93 60

**Vergleichsmessung durchgeführt von:**

EMPA Materials Science and Technology

Abteilung Verbrennungsmotoren

**Autoren des Berichts:**

Christian Bach (Empa)

Dr. Stephan Lienin (sustainserv GmbH)

**Kontakt:**

EMPA Materials Science and Technology

Christian Bach, christian.bach@empa.ch

Leiter Abteilung Verbrennungsmotoren

Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Tel: +41 44 823 4137

sustainserv GmbH

Dr. Stephan Lienin, stephan.lienin@sustainserv.com

Director sustainserv und Projektkoordinator Novatlantis-Projekt „Erlebnisraum Mobilität“

Gartenstrasse 25, 8002 Zürich

Tel. +41 43 322 1010

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Zusammenfassung.....	2
3	Ausgangslage.....	6
3.1	Luftbelastung in den Städten.....	6
3.2	Untersuchte Schadstoffe.....	8
3.2.1	Feinstaub (Partikelanzahl und Partikelmasse).....	8
3.2.2	Ozonvorläufer-Schadstoffe.....	9
3.2.3	Treibhausgasemissionen.....	10
4	Versuchsaufbau.....	11
5	Ergebnisse.....	13
5.1	Partikelmasse.....	13
5.2	Partikelanzahl.....	14
5.3	Ozonvorläufer-Schadstoffe.....	16
5.3.1	Kohlenwasserstoffe.....	16
5.3.2	Stickoxide.....	17
5.4	Treibhausgasemissionen.....	19
5.5	Gesamtbeurteilung.....	20
6	Anhang.....	21

# 1 Einleitung

In der Diskussion über den Emissionsvergleich der verschiedenen Antriebsarten von Personenwagen in der Schweiz existieren nur wenige Vergleichsdaten zu aktuellen Fahrzeugen, die auf tatsächlichen Messungen beruhen. Meistens wird noch auf die Studie des BUWAL von 1998<sup>1</sup> verwiesen. Diese Daten sind jedoch für die Beurteilung von Neufahrzeugen veraltet, da die Fahrzeugtechnologie von Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeugen weiterentwickelt wurde. In der vorliegenden Vergleichsmessung wurden nur Fahrzeuge miteinander verglichen, die heute im Handel erhältlich sind und die gemäss Hersteller die Euro-4-Abgasvorschriften einhalten.

Die Untersuchungen wurden an der Empa im Rahmen der Erhebung der Emissionsfaktoren des schweizerischen Strassenverkehrs in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) durchgeführt. Sie sind Teil der Anstrengungen des BAFU, die Daten für die Beurteilung von Fahrzeugemissionen laufend zu aktualisieren. Die Studie wurde ebenfalls unterstützt von Novatlantis - „Nachhaltigkeit im ETH-Bereich“. Im Novatlantis-Projekt „Erlebnisraum Mobilität“ werden im Rahmen der Pilotregion Basel Fahrzeuge der nächsten Generation mit besonders sauberen und effizienten Antrieben getestet und Strategien für einen nachhaltigeren Fahrzeugverkehr entwickelt. Die vorliegende Vergleichsmessung liefert Fakten für die aktuelle Diskussion zum Vergleich und dem mittelfristigen Potential der Antriebs-technologien und deren zugehörige Treibstoffe.

Die Abteilung Verbrennungsmotoren der Empa setzt sich mit der Weiterentwicklung von Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeugen auseinander. Die Empa ist in Zusammenarbeit mit verschiedenen Fahrzeugherstellern an Entwicklungsprojekten für alle Antriebsarten beteiligt und hat in ihrem Abgaslabor modernste Messmethoden und -technologien für die Messung von Partikel- und Abgasemissionen zur Verfügung.

Die Studie mit Fokus auf den Emissionsvergleich der Fahrzeuge ergänzt die aktuelle, vielfach zitierte Studie der Empa<sup>2</sup> zur Ökobilanzierung verschiedener Biotreibstoffe. Beide Studien zusammen geben zahlreiche Anhaltspunkte für die Beurteilung der Potentiale für den Klimaschutz und die Luftreinhaltung im Bereich des Personenwagenverkehrs.

---

<sup>1</sup> BUWAL, Ökobilanz der Treibstoffe (1998)

<sup>2</sup> Zah R., Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen (2007)

## 2 Zusammenfassung

Insgesamt wurden 32, heute auf dem Markt erhältliche Euro-4-Personenwagen untersucht: Benzinfahrzeuge (mit und ohne Direkteinspritzung), Dieselfahrzeuge (mit und ohne Dieselpartikelfilter) sowie Erdgasfahrzeuge. Dabei stand die Untersuchung der wichtigsten Emissionen im Vordergrund: Feinstaub, Ozonvorläuferschadstoffe (Stickoxide und Kohlenwasserstoffe) sowie Treibhausgase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ). Die im Abgaslabor der Empa in Dübendorf vorgenommenen Messungen wurden einerseits im offiziellen Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), der für die Zulassung von Fahrzeugen verwendet wird, und andererseits im Artemis-Fahrzyklus, der das reale Fahrverhalten abbildet, durchgeführt.

Die Messungen zeigen insgesamt, dass alle Antriebstechnologien (Antriebe mit Benzin, Diesel, Erdgas) in den letzten Jahren sauberer geworden sind, was aufgrund kontinuierlicher technologischer Weiterentwicklung in allen Bereichen und Einführung des Euro-4-Standards nicht überrascht. Bei immer sauberer werdenden Fahrzeugen rückt die Emission der Treibhausgase für eine ökologische Beurteilung zunehmend in den Vordergrund. Hier sind Erdgasfahrzeuge mit ca. 21% niedrigeren Emissionen gegenüber Benzinfahrzeugen und ca. 11% niedrigeren Emissionen gegenüber Dieselfahrzeugen mit Partikelfilter nach wie vor im Vorteil.

Trotz sinkender Abgasemissionen ist die Belastung der Atemluft durch Feinstaub und Ozon keinesfalls gelöst. Obwohl die verkehrsbedingten Emissionen schweizweit deutlich abnehmen, ist die Belastung der Luftqualität gerade in Schweizer Städten nach wie vor ein Problem, das eine stetige Weiterentwicklung in Richtung noch sauberer Antriebe nötig macht und auch Anlass für diese Studie war. Antriebssysteme, die nicht auf den städtischen Einsatz hin optimiert sind, sowie emissionsmässig nicht-optimale Fahrweisen in der Stadt sind nach wie vor Gründe dafür, dass die an sich gesunkenen Abgasemissionen noch nicht in wesentlich verbesserten Luftqualitäten Schweizer Städte resultiert.

Die im Verbrennungsmotor produzierten Feinstaubpartikel stellen aufgrund ihrer geringen Grösse ein gesundheitliches Risiko dar, das nach Ansicht von Fachleuten durch die Partikelanzahl besser erfasst wird, als durch die heute noch vorgeschriebene Partikelmasse. Die Emissionsmessungen zeigen, dass Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter die Luft im offiziellen Europäischen Fahrzyklus mit einer rund 250-mal höheren Partikelanzahl belasten als alle anderen Antriebssysteme. Benzinfahrzeuge (mit und ohne Direkteinspritzung), Erdgasfahrzeuge sowie Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter emittieren eine Partikelanzahl auf vergleichbar niedrigerem Niveau. Die Verwendung von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen ist daher eine der wichtigsten Massnahmen, die auch vom BAFU schon lange gefordert wird.

Bei den für die Ozonbildung verantwortlichen  $\text{NO}_x$ -Emissionen emittieren Benzin- und Erdgasfahrzeuge auf tiefem und vergleichbarem Niveau. Dagegen stossen Dieselfahrzeuge im Vergleich dazu ca. zehnmal höhere  $\text{NO}_x$ -Emissionen aus. Vergleicht man den für die Ozonbildung relevanteren und auch gesundheitlich problematischeren  $\text{NO}_2$ -Anteil an den  $\text{NO}_x$ -Emissionen, zeigen sich noch grössere Unterschiede. Während Benzin- und Erdgasfahrzeuge nahezu kein  $\text{NO}_2$  ausstossen, liegt der  $\text{NO}_2$ -Anteil bei den Dieselfahrzeugen mit und ohne Partikelfilter bei 30 bis 50% der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Dieselfahrzeuge tragen demnach wesentlich mehr zur lokalen Ozonbildung bei als Benzin- oder Erdgasfahrzeuge.

Bei den Gesamt-Kohlenwasserstoffemissionen (T.HC) weisen die Erdgasfahrzeuge im Mittel 30% höhere Werte auf als die Benzinfahrzeuge bzw. doppelt so hohe Werte wie die Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter. Allerdings bestehen die Gesamtkohlenwasserstoffe von Erdgasfahrzeugen zu 85% aus ungiftigem und für die Ozonbildung nicht relevantem Methan. Bei der für die Ozonbildung wesentlichen Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) weisen Erdgasfahrzeuge die niedrigsten Emissionen auf.

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse zusammenfassend graphisch dargestellt. Dabei ist die Antriebstechnologie mit dem jeweils grössten Emissionswert als 100% gesetzt. Somit sind die verbesserten Leistungen der jeweils anderen Antriebstechnologien gut ersichtlich.

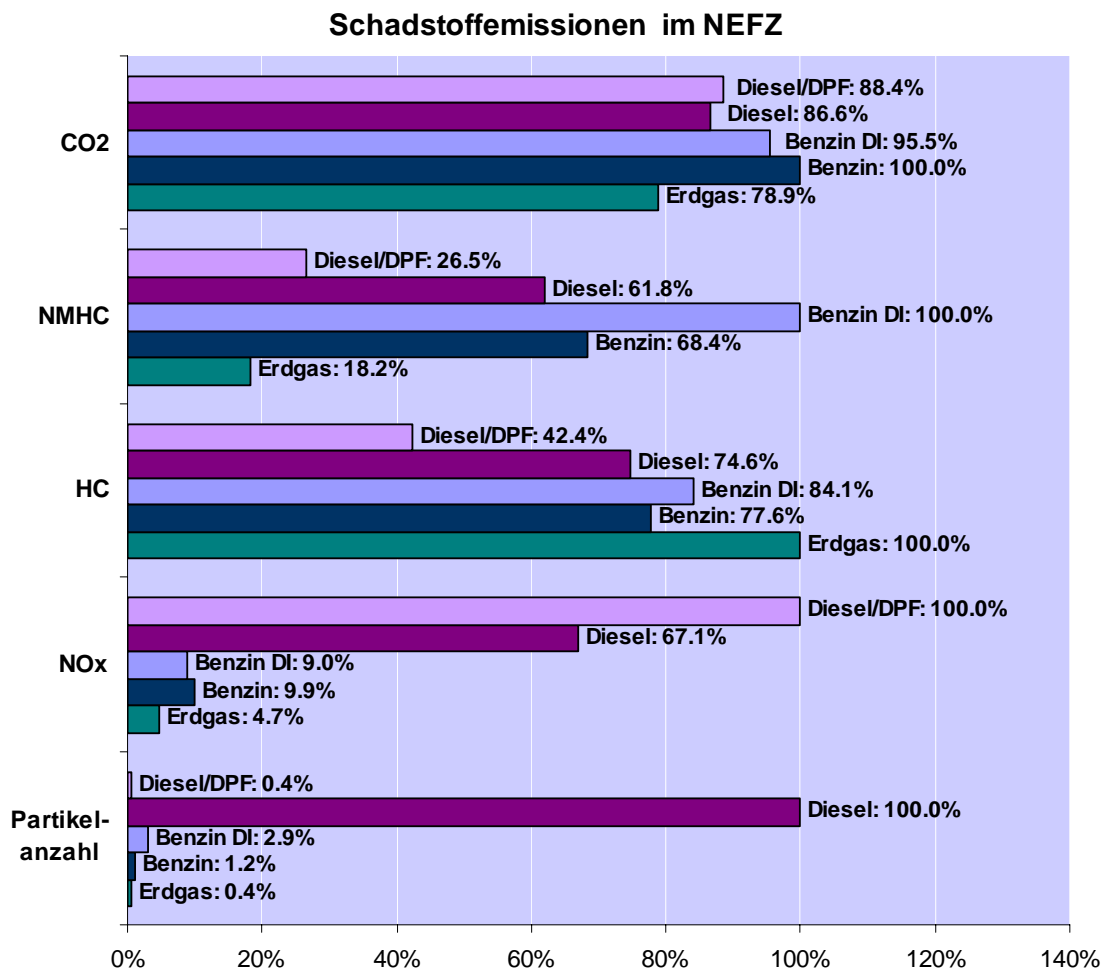


Abb. 1 Zusammenfassung der Emissionen von Erdgas-, Benzin- und Dieselfahrzeugen im offiziellen Europäischen Fahrzyklus NEFZ. Dargestellt sind mittlere Emissionen; für Streubereich siehe weiteren Bericht. Diesel / DPF: Diesel mit Dieselpartikelfilter, Diesel: Diesel ohne Dieselpartikelfilter, Benzin DI: Benzin mit Direkteinspritzung, Benzin: Benzin, Erdgas: Erdgas. Bei den Partikelemissionen wurde die wesentlichere Partikelanzahl für die Darstellung ausgewählt.

Der relative Vergleich zeigt, dass Erdgasfahrzeuge erstens hinsichtlich Treibhausgasemissionen und zweitens durch gleichzeitig niedrige Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffen (NMHC) bezüglich Ozonbildungspotential am besten abschneiden. Benzinfahrzeuge sind bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen auf vergleichbar tiefem Niveau, sind jedoch die Fahrzeuge mit den grössten Treibhausgasemissionen. Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter zeigen wie Benzin- und Erdgasfahrzeuge gute Resultate bei den Partikelemissionen, sind aber bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen deutlich schlechter. Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter schneiden aus Umweltgesichtspunkten wegen der hohen Partikelemissionen und den höheren NO<sub>x</sub>-Emissionen am schlechtesten ab.

Der Vergleich der Abgasemissionen im offiziellen Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ und im realitätsnahen Artemis-Fahrzyklus zeigt in der Regel ähnliche Unterschiede im Emissionsverhalten zwischen den verschiedenen Antriebskonzepten; Unterschiede gibt es allerdings beim absoluten Emis-

sionsniveau. Die Messungen im Artemis-Zyklus geben jedoch insgesamt einen vertieften Einblick und legen Schwächen einzelner Fahrzeugmodelle in bestimmten Fahrsituationen (z.B. Stadtverkehr, Überland, Autobahn) offen. Der weitere Bericht zeigt dafür einige Beispiele auf. Die Messungen zeigen auch, dass die Streuungen unterschiedlicher Fahrzeugmodelle einer Antriebstechnologie beträchtlich und in der Regel wesentlich grösser sind als der systematische Unterschied zwischen den Antriebstechnologien.

Derzeit stehen die biogenen Treibstoffe im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Die Mitte des Jahres veröffentlichte Studie der Empa (siehe Einleitung) hat gezeigt, dass es grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Biotreibstoffen hinsichtlich deren Ökobilanz gibt. Aus Sicht der Abgasemissionsmessungen soll hier nur kurz ergänzend auf Biotreibstoffe eingegangen werden. Die im Bericht dargestellten Messwerte gelten nur eingeschränkt für den Einsatz von Biotreibstoffen. Für Biogas, welches aufbereitet dem Erdgas beigemischt werden kann und diesem chemisch entspricht, gelten die gemessenen Werte uneingeschränkt. Für Fahrzeuge, die mit flüssigen Biotreibstoffen wie Biodiesel oder Ethanol betrieben werden, können diese Emissionswerte nicht übernommen werden, da sich diese Treibstoffe sowohl vom chemischen Aufbau wie auch von den physikalischen Eigenschaften von Benzin und Diesel unterscheiden.



# 3 Ausgangslage

## 3.1 Luftbelastung in den Städten

Die vom Gesetzgeber limitierten Abgasemissionen von Strassenfahrzeugen (Kohlenmonoxid CO, Gesamt-Kohlenwasserstoffe T.HC, Stickoxide NO<sub>x</sub>, Partikelmasse PM) konnten in den letzten 20 Jahren dank der Einführung verschiedener Abgasnachbehandlungssysteme und Verbesserungen in der Motorentechnik sowie den Treib- und Schmierstoffen massiv vermindert werden. Die verkehrsbedingten Emissionen dieser Schadstoffe nehmen deshalb über die ganze Schweiz betrachtet seit einigen Jahren deutlich ab<sup>3</sup> (Abb. 2).

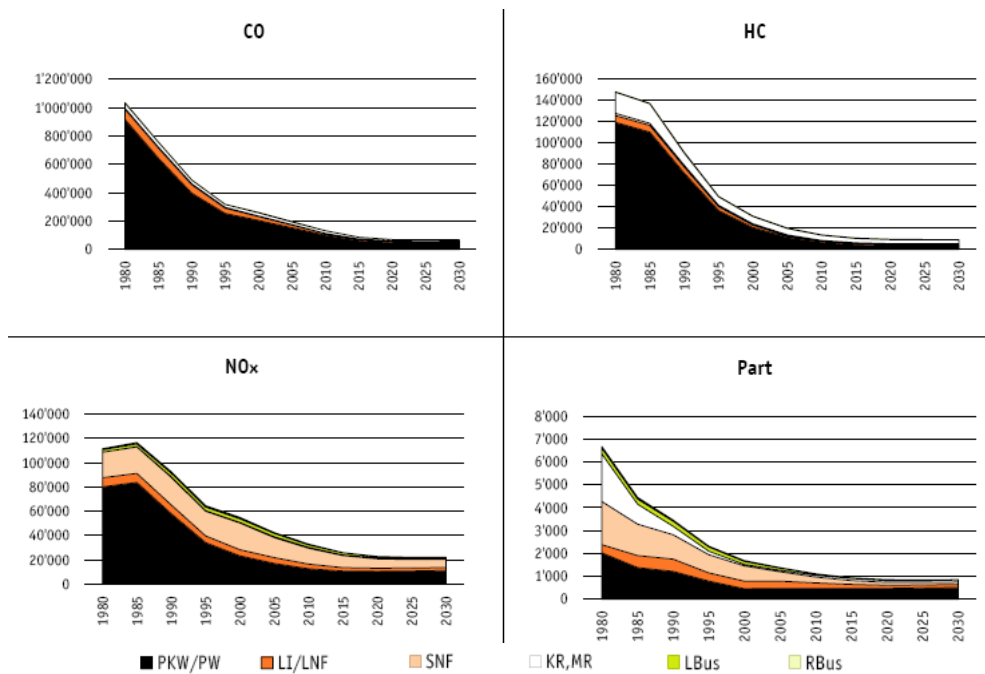


Abb. 2 Emissionsentwicklung 1980 - 2030 [T/a] nach Fahrzeugkategorie (Quelle: BAFU)

<sup>3</sup> BAFU, Emissionen des Strassenverkehrs, Bericht 355

Ein anderes Bild zeigt sich allerdings, wenn man die Entwicklung der Luftqualität in Städten betrachtet<sup>4</sup> (Abb. 3):

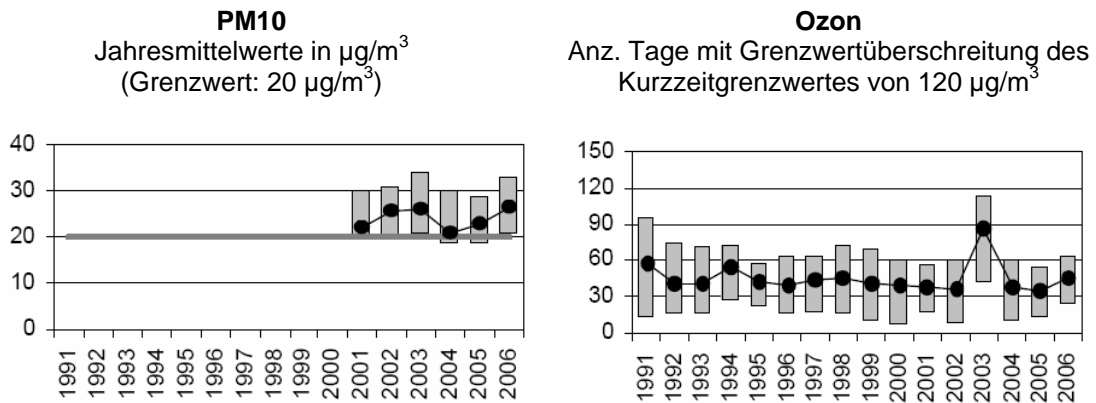


Abb. 3 Feinstaub- (PM10) und Ozonbelastung an städtischen Standorten in der Ostschweiz (Quelle: Ostluft)

Die Belastung der Atemluft mit PM10 (Partikel) und Ozon konnte in den Städten trotz den gesamtschweizerischen Verbesserungen im Verkehrsbereich in den letzten 10 Jahren nicht wesentlich reduziert werden. Zu hohe Emissionen an zum Teil nicht-limitierten Abgasbestandteilen, die die Ozonbildung positiv beeinflussen, sind nach wie vor Gründe dafür, dass die an sich gesunkenen Abgasemissionen noch nicht in wesentlich verbesserter Luftqualität in Schweizer Städte resultiert. Die gestiegenen Fahrleistungen in den Städten und die städtische Fahrweise (Kurzstrecken, Stop-and-go, transientes Fahrprofil, usw.) mit im Vergleich zum offiziellen europäischen Fahrzyklus NEFZ überproportional hohen Emissionen kompensieren die Fortschritte bei den Emissionen zudem zumindest teilweise.

Der Einsatz besonders abgasarmer Fahrzeuge stellt deshalb insbesondere für den städtischen Einsatz nach wie vor eine für die Luftreinhaltung wichtige Massnahme dar.

Gleichzeitig müssen die Anstrengungen zur Verminderung der verkehrsbedingten  $\text{CO}_2$ -Emissionen verstärkt werden, denn im Gegensatz zu der im  $\text{CO}_2$ -Gesetz geplanten Verminderung dieser Emissionen um 8% gegenüber 1990 sind sie bis 2005 in diesem Zeitraum um 9% gestiegen<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Ostluft, Luftqualität 2006 in der Ostschweiz und in Liechtenstein (Jahresbericht 2006)

<sup>5</sup> BAFU, Treibhausgasinventar der Schweiz (2007)

## 3.2 Untersuchte Schadstoffe

Die Vergleichsstudie richtet sich auf folgende Schadstoffe aus:

- Feinstaub (Partikelanzahl- und Partikelmasseemissionen)
- Ozonvorläuferschadstoffe (Stickoxide und Kohlenwasserstoffe)
- Treibhausgase (Kohlendioxid und Methanemissionen)

### 3.2.1 Feinstaub (Partikelanzahl und Partikelmasse)

Die motorischen Partikelemissionen stellen aufgrund ihrer geringen geometrischen Grösse von bis 300 nm ein grösseres gesundheitliches Risiko dar, als z.B. mechanisch erzeugter Feinstaub wie Pneuabrieb oder aufgewirbelter Strassenstaub. Solche Partikel sind typischerweise grösser als 1 µm. Je kleiner die Feststoffteile sind, desto gravierender können die gesundheitlichen Auswirkungen sein. Motorische Partikel gehören zu den kleinsten Partikeln in der Atemluft. Aufgrund ihrer sehr geringen Grösse tragen sie kaum zur Partikelmasse bei, auch wenn sie an verkehrsbelasteten Standorten anzahlmässig dominieren. Nach Ansicht von Fachleuten wird die Gesundheitsgefährdung durch die Partikelanzahl besser erfasst als durch die heute noch vorgeschriebene Partikelmasse. In dieser Studie werden beide Grössen erfasst.

Die Partikelmasse wurde in dieser Studie entsprechend dem offiziellen Europäischen Verfahren nach 70/220/EWG<sup>6</sup> ermittelt. Dabei wird ein dem verdünnten Abgas proportionaler Teilstrom über zwei teflonbeschichtete Glasfaserfilter geleitet, die vor und nach dem Test einheitlich konditioniert und auf einer Mikrowaage gewogen werden. Die Partikelmasse wird durch die Differenz der Wägungen multipliziert mit dem Quotient aus verdünntem Abgas und Probenahmevolumen bestimmt. Die Partikelanzahl wurde anhand des Entwurfs der UN/ECE-Arbeitsgruppe PMP für ein neues Partikelmessverfahren durchgeführt. Dabei wird eine Probe des verdünnten Abgases mittels zweistufiger Verdünnung nochmals um einen Faktor 10 bis 100 verdünnt und dann durch eine beheizte Leitung geführt, um die an den Partikeln adsorbierten flüchtigen Anteile zu verdampfen. Die Partikelanzahl wurde dann mittels eines Kondensationskernzählers (CPC) gemessen<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> Directive 98/69/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC. L 350/1, 1998

<sup>7</sup> Sem GJ. Design and performance characteristics of three continuous-flow condensation particle counters: a summary. Atmos. Res. 62, 267-294, 2002

### 3.2.2 Ozonvorläufer-Schadstoffe

Zu den verkehrsbedingten Ozonvorläuferschadstoffen werden die Kohlenwasserstoffemissionen und die Stickoxide gezählt. Die Gruppe der Kohlenwasserstoffe beinhalten über Hundert verschiedene Einzelkohlenwasserstoffe, die je nach ihrer Struktur und chemischen Zusammensetzung unterschiedliche Wirkungen aufweisen. Für eine Bewertung der Ozonreaktivität muss die Gruppe der Kohlenwasserstoffe zumindest in ozonreaktive Nicht-methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) und in die klimarelevanten Methanemissionen ( $\text{CH}_4$ ) unterteilt werden. Bei den Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) ist der Anteil der  $\text{NO}_2$ -Emissionen für die lokale Ozonproduktion mitverantwortlich.  $\text{NO}$  wird zwar in der Atmosphäre auch zu  $\text{NO}_2$  umgewandelt, dies erfordert jedoch eine gewisse Zeit, während der die Emissionen verdünnt und durch Luftbewegungen wegtransportiert werden. Fahrzeuge, die einen höheren  $\text{NO}_2$ -Ausstoß aufweisen, können deshalb bereits am Ort der Emission (z.B. in der Stadt) die Ozonbildung erhöhen.

Der  $\text{NO}_2$ -Anteil im städtischen Umfeld ist in den letzten Jahren stark angestiegen (Abb. 4).

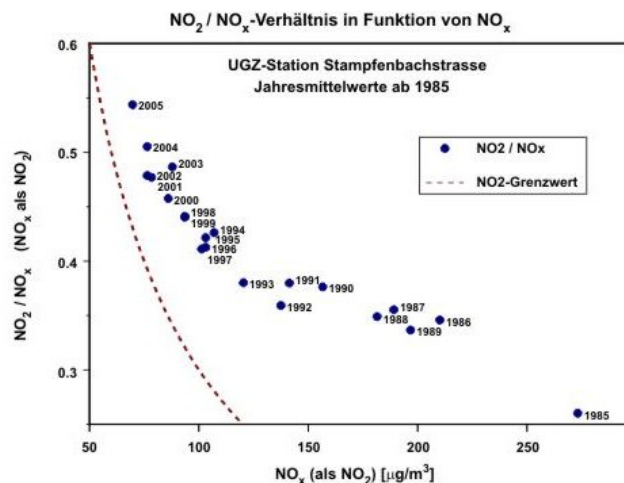


Abb. 4  $\text{NO}_2$ -Anteil an den Stickoxiden ( $\text{NO}_x = \text{Summe von NO und NO}_2$ ) von 1985 bis 2005 in der Stadt Zürich (Quelle: Stadt Zürich)

Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen aus Verbrennungsprozessen bestehen vorwiegend aus Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ), der Rest ist Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ). Diese beiden Verbindungen werden addiert und als  $\text{NO}_x$ -Emissionen ausgewiesen. Der Anstieg des  $\text{NO}_2$ -Anteils wird auf den gestiegenen Anteil an Dieselfahrzeugen mit Oxidationskatalysator und die Einführung des Partikelfilters zurückgeführt.

Um eine wirkungsorientierte Beurteilung des Einflusses von Autoabgasen auf die lokale Ozonbildung vornehmen zu können, wurden in dieser Untersuchung die NMHC- und die  $\text{NO}_2$ -Emissionen ebenfalls gemessen.

### 3.2.3 Treibhausgasemissionen

Als Treibhausgase werden Schadstoffe bezeichnet, die zur Klimaerwärmung beitragen. Diese Gase adsorbieren einen Teil der vom Boden reflektierten Infrarotstrahlung der Sonne und erwärmen damit die Erdatmosphäre.

Neben den Kohlendioxidemissionen ( $\text{CO}_2$ ), die als Hauptverursacher der Klimaerwärmung gelten, weist bei den Auspuffemissionen von Motorfahrzeugen auch Methan ( $\text{CH}_4$ ) eine relevante Treibhausgaswirkung auf. Andere Treibhausgase wie Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ), machen nur einen geringen Anteil an den Treibhausgasen aus und werden deshalb in der Regel nicht berücksichtigt. Die  $\text{CH}_4$ -Emissionen werden entsprechend ihrer im Vergleich zum  $\text{CO}_2$  stärkeren Treibhausgaswirkung mit dem Faktor 21 multipliziert und zusammen mit den  $\text{CO}_2$ -Emissionen in einem  $\text{CO}_2$ -Äquivalent ( $\text{CO}_2$ -Äq.) ausgedrückt.

Gemäss BAFU<sup>5</sup> betragen die  $\text{CO}_2$ -Emissionen des Strassenverkehrs im Jahr 1990 rund 13.7 Mio-Tonnen und 2005 rund 15 Mio-Tonnen (Anstieg um 9%). Das Ziel des  $\text{CO}_2$ -Gesetzes beim Strassenverkehr wäre eigentlich eine Reduktion um 8% unter den Stand von 1990 bis 2010. Dieses Ziel wird mit grosser Sicherheit nicht erreicht.

## 4 Versuchsaufbau

Die Messungen wurden auf einem Rollenprüfstand gemäss EU-Richtlinie 70/22/EWG durchgeführt (Abb. 5). Allerdings wurden die Messungen ohne vorgängige Wartung der Fahrzeuge und nicht mit für Zulassungsprüfungen erforderlichen Referenztreibstoffen, sondern im Zustand, wie sie auf der Strasse eingesetzt werden und mit handelsüblichen Treibstoffen durchgeführt. Zusätzlich zu den reglementierten Schadstoffen wurden die Methan-, die Stickstoffdioxid- und die Partikelanzahlmissionen gemessen. Die Methanemissionen wurden mittels Gaschromatografie und die NO<sub>2</sub>-Emissionen durch einen Chemilumineszenzanalysator bestimmt. Die Partikelanzahlmessung wurde entsprechend dem PMP-Messprozedere<sup>8</sup> vorgenommen.

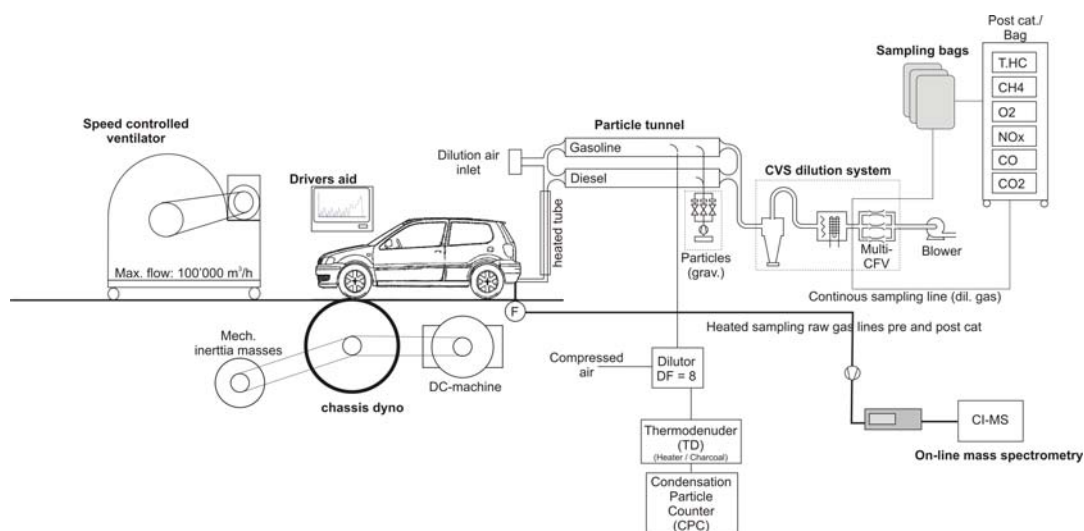


Abb. 5 Versuchsaufbau

Die Fahrzeuge wurden mit handelsüblichen, fossilen Treibstoffen betrieben. Die Ergebnisse der Erdgasfahrzeuge können auch für der Verwendung von aufbereitetem Biogas (z.B. Kompogas) bzw. beliebige Mischung von Erdgas und aufbereitetem Biogas verwendet werden, da das aufbereitete Biogas chemisch dem Erdgas entspricht. Da flüssige Bio-Treibstoffe, wie sie dem Benzin oder Diesel beigemischt werden, den jeweiligen fossilen Treibstoffen chemisch nicht entsprechen, können die dargestellten Emissionswerte der Benzin- und Dieselfahrzeuge nicht ohne weiteres auf flüssige Biotreibstoffe übertragen werden.

Untersucht wurden insgesamt 32, heute auf dem Markt erhältliche Fahrzeuge. 14 Fahrzeuge mit konventionellem Benzinmotor (B), 2 Benzinfahrzeuge mit Direkteinspritzung (B-DI), 7 Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter (D), 6 Dieselfahrzeuge mit Dieselpartikelfilter (D-DPF) und 3 Erdgasfahrzeuge (NGV).

<sup>8</sup> Particulate Measurement Program der UN/ECE

Für die Untersuchungen wurden Messungen im offiziellen Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), der für die Typenprüfung von Personen- und Lieferwagen eingesetzt wird (Abb. 6), und im Artemis-Fahrzyklus, der im Rahmen eines Europäischen Projektes basierend auf dem realen Fahrverhalten in Europa entwickelt wurde (Abb. 7), durchgeführt.

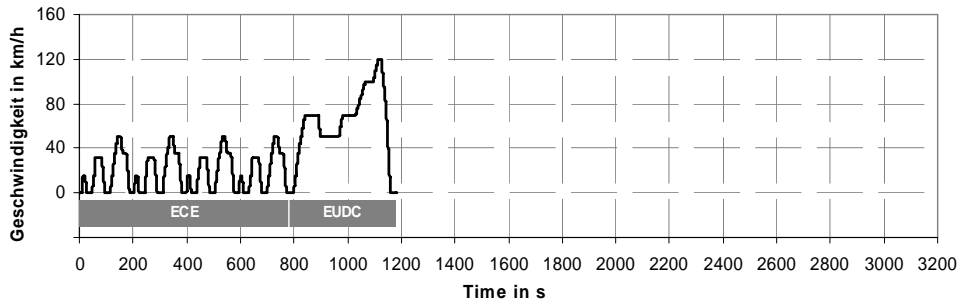


Abb. 6 Offizieller europäischer Fahrzyklus (NEFZ)

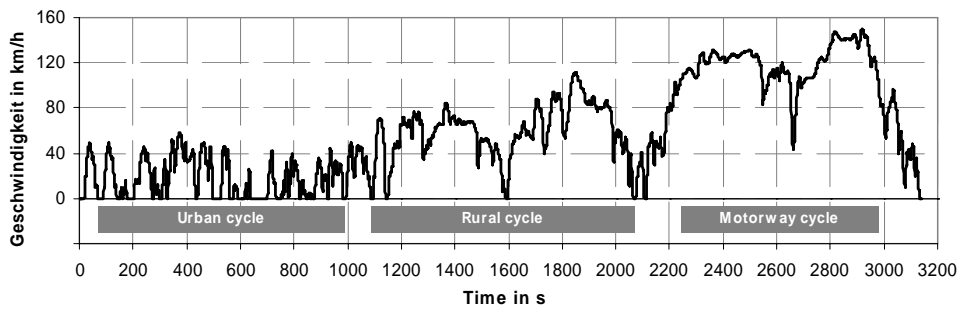
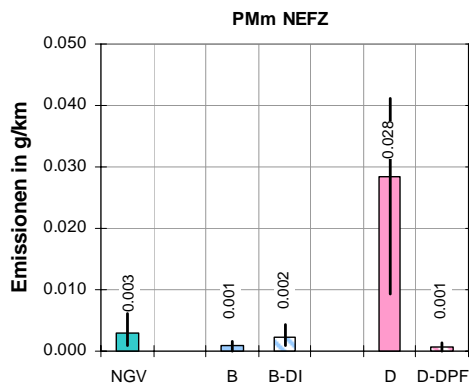


Abb. 7 Realitätsnaher Artemis-Fahrzyklus (CADC)

# 5 Ergebnisse

## 5.1 Partikelmasse

Die aktuellen Abgasvorschriften limitieren die Partikelmasse-Emissionen von Dieselfahrzeugen. Die Einführung eines Partikelanzahlgrenzwertes ist für künftige Abgasvorschriften vorgesehen.



Die Partikelmasse von Dieselfahrzeugen mit Partikelfilter, Benzin- und Erdgasfahrzeugen weisen keinen statistisch gesicherten Unterschied auf. Sie liegt bei diesen Fahrzeugen im Bereich von 5 – 10% des aktuellen Grenzwertes (0.025 g/km).

Die Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter liegen im Mittel leicht, einzelne Fahrzeuge sogar deutlich über dem Grenzwert.

Abb. 8 Partikelmassenemissionen im offiziellen europäischen Fahrzyklus. Dargestellt sind die Mittelwerte sowie die Min- und Max-Werte.

Im Artemis-Fahrzyklus wurden folgende Partikelmasseemissionen gemessen:

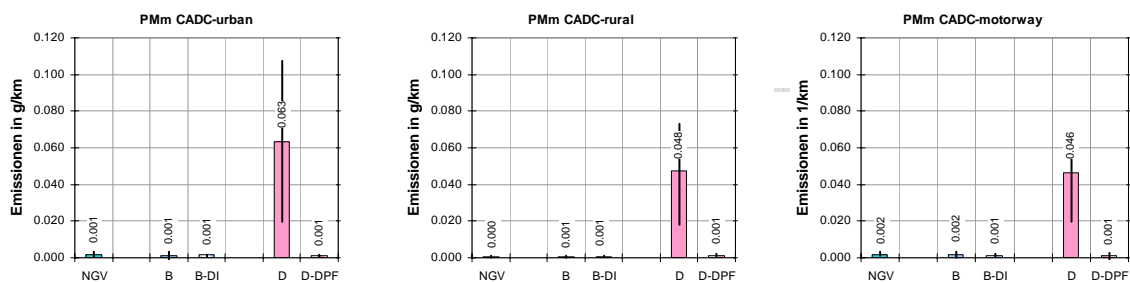
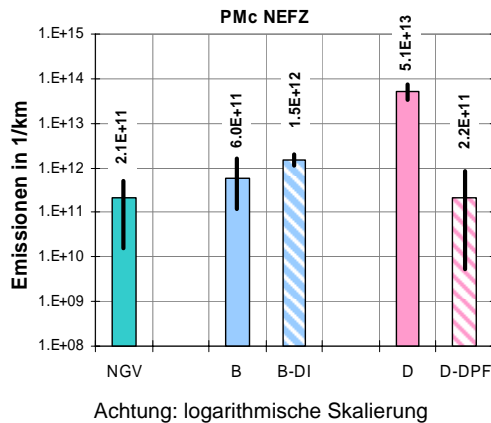


Abb. 9 Partikelmasse im Artemis-Fahrzyklus (CADC) mit den Teilzyklen Stadt (CADC urban), Überland (CADC-rural) und Autobahn (CADC-motorway). Dargestellt sind die Mittelwerte sowie die Min- und Max-Werte.

Im Artemis-Fahrzyklus liegen die Partikelmassenemissionen der Erdgas-, Benzin- und Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter ebenfalls auf sehr niedrigen Werten. Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter weisen im Mittel eine rund 25- bis 50-fach höhere Partikelmasse auf als die anderen Fahrzeuggruppen.



## 5.2 Partikelanzahl



Im NEFZ weisen die Erdgas-, Benzin- und die Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter die niedrigsten Partikelanzahlemissionen auf. Statistisch gesichert liegen die Emissionen der direkt eingespritzten Benzinfahrzeuge leicht höher als diejenigen der Erdgasfahrzeuge und der Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter.

Besonders hervorzuheben ist der grosse Unterschied zwischen den Dieselfahrzeugen ohne Partikelfilter und allen anderen Fahrzeugen. Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter weisen rund 250-mal höhere Partikelanzahlemissionen auf, als die Erdgas- und Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter.

Abb. 10 Partikelanzahlemissionen im offiziellen europäischen Fahrzyklus. Dargestellt sind die Mittelwerte sowie die Min- und Max-Werte.

Vergleicht man die Partikelanzahlemissionen der Fahrzeuge im Artemis-Fahrzyklus, so ergibt sich folgendes Bild:

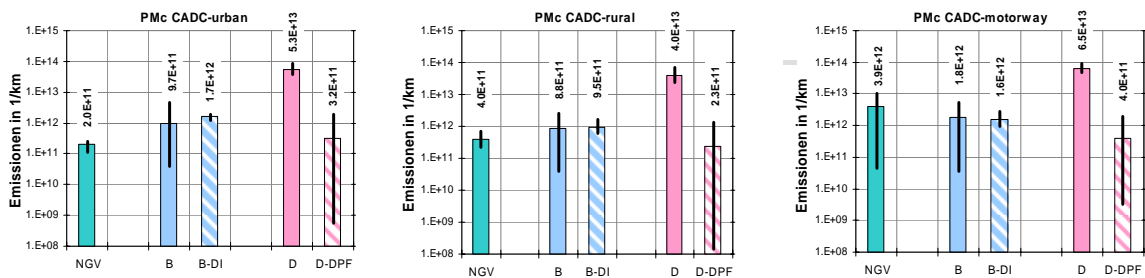


Abb. 11 Partikelanzahlemissionen im Artemis-Fahrzyklus (CADC) mit den Teilzyklen Stadt (CADC urban), Überland (CADC-rural) und Autobahn (CADC-motorway). Dargestellt sind die Mittelwerte sowie die Min- und Max-Werte.

Im Stadtfahrzyklus (CADC-urban) weisen die Erdgasfahrzeuge wie schon im offiziellen Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ im Mittel die niedrigste Partikelanzahlemission auf. Die Unterschiede zu den konventionellen Benzinfahrzeugen und den Dieselfahrzeugen mit Partikelfilter sind jedoch nicht signifikant. Abb. 10 und 11 zeigen, dass die Partikelanzahlemissionen innerhalb der Fahrzeuggruppe wesentlich stärker variieren können als zwischen den verschiedenen Antriebskonzepten. So weist das Dieselfahrzeug mit Partikelfilter mit den niedrigsten Partikelanzahlemissionen eine um 2 bis 4 Grössenordnungen (Faktor 600 - 9'000) niedrigere Partikelanzahl auf als das Dieselfahrzeug mit Partikelfilter mit den höchsten Partikelanzahlwerten.

Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen kann heute festgestellt werden, dass moderne direkteingespritzte Benzinmotoren im realen Betrieb (CADC-Zyklus) nicht mehr signifikant höhere Partikelanzahlemissionen aufweisen als konventionelle Benzinfahrzeuge mit Saugrohreinspritzung.

Die Untersuchungen im Artemis-Zyklus geben auch Aufschluss in einige spezifische Schwachpunkte einzelner Fahrzeugmodelle, die in der Weiterentwicklung berücksichtigt werden können. Hier ein Beispiel: Die Partikelanzahlemissionen weisen bei den Erdgasfahrzeugen im Mittel mit zunehmender Last im Überland- und Autobahnzyklusteil (CADC-rural bzw. CADC-motorway) steigende Werte auf. Die Min-Werte (d.h. die Partikelanzahl des Erdgasfahrzeuges mit den niedrigsten Werten) bleiben jedoch praktisch unverändert niedrig. Die steigende Partikelanzahlemission bei einem Teil der Erdgasfahrzeuge ist auf den Einsatz von zum Teil noch nicht optimaler Technologie zurückzuführen, nicht aber auf systembedingte Mehremission bei Erdgasfahrzeugen. Dies zeigt sich, wenn der Verlauf der Partikelanzahlemissionen im Fahrzyklus dargestellt wird (Abb. 12)

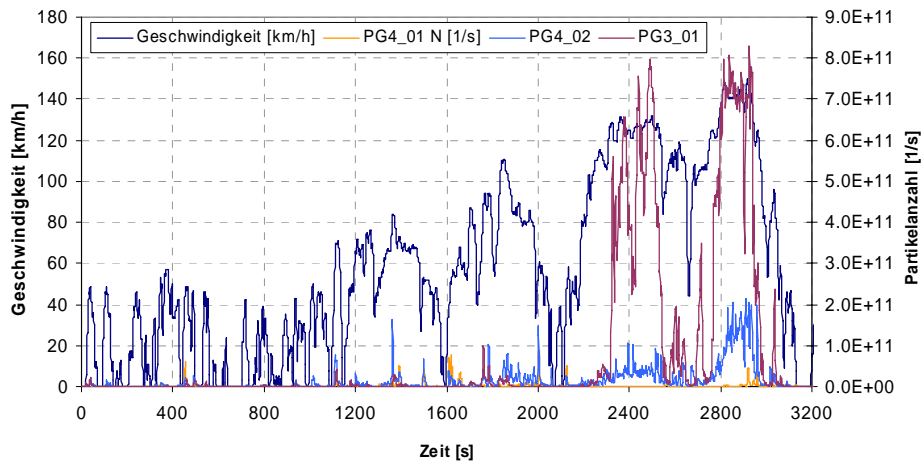


Abb. 12 Verlauf der Partikelanzahlemissionen im Artemis-Fahrzyklus (CADC). Dargestellt sind die Partikelanzahlverläufe der 3 Erdgasfahrzeuge.

Bis zu einer Geschwindigkeit von 120 km/h weisen alle Erdgasfahrzeuge sehr niedrige Partikelanzahlemissionen auf. Das Erdgasfahrzeug mit den geringsten Partikelanzahlemissionen (orange Kurve) weist auch bei hoher Last (über 120 km/h) keine Erhöhung der Partikelanzahlemissionen auf. Die beiden anderen Fahrzeuge (blaue und violette Kurve) emittieren in diesem Bereich höhere Partikelanzahlemissionen als bei niedrigen Geschwindigkeiten.

## 5.3 Ozonvorläufer-Schadstoffe

### 5.3.1 Kohlenwasserstoffe

Bei den Gesamt-Kohlenwasserstoffemissionen (T.HC) im offiziellen Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ weisen die Erdgasfahrzeuge im Mittel 30% höhere Werte auf als die Benzinfahrzeuge bzw. doppelt so hohe Werte wie die Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter. Allerdings bestehen die Gesamtkohlenwasserstoffe von Erdgasfahrzeugen zu 85% aus ungiftigem und für die Ozonbildung nicht relevantem Methan. Betrachtet man aber die für die Ozonbildung relevanten Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe (NMHC), so weisen die Erdgasfahrzeuge die niedrigsten Emissionen auf (rechtes Diagramm).

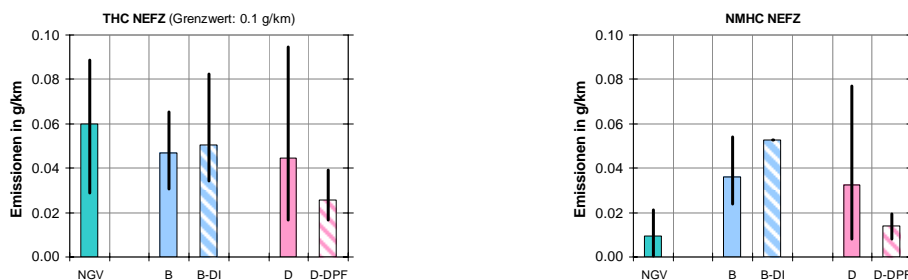


Abb. 13 Gesamt-Kohlenwasserstoffe T.HC (linkes Diagramm) und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe NMHC (rechtes Diagramm)

Die NMHC-Emissionen liegen im Mittel bei den Erdgasfahrzeugen bei ca. 15%, bei den Dieselfahrzeugen bei ca. 55% (mit Partikelfilter) bzw. 75% (ohne Partikelfilter) und bei den Benzinfahrzeugen bei 75% (konventionelle Motoren) bzw. nahezu 100% (direkt eingespritzte Motoren) der T.HC-Emissionen. Auffallend sind auch hier die grossen Streubereiche innerhalb eines Antriebskonzepts, die zum Teil deutlich grösser ausfallen als die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fahrzeugkategorien.

Im Artemis-Zyklus zeigt sich folgendes Bild:

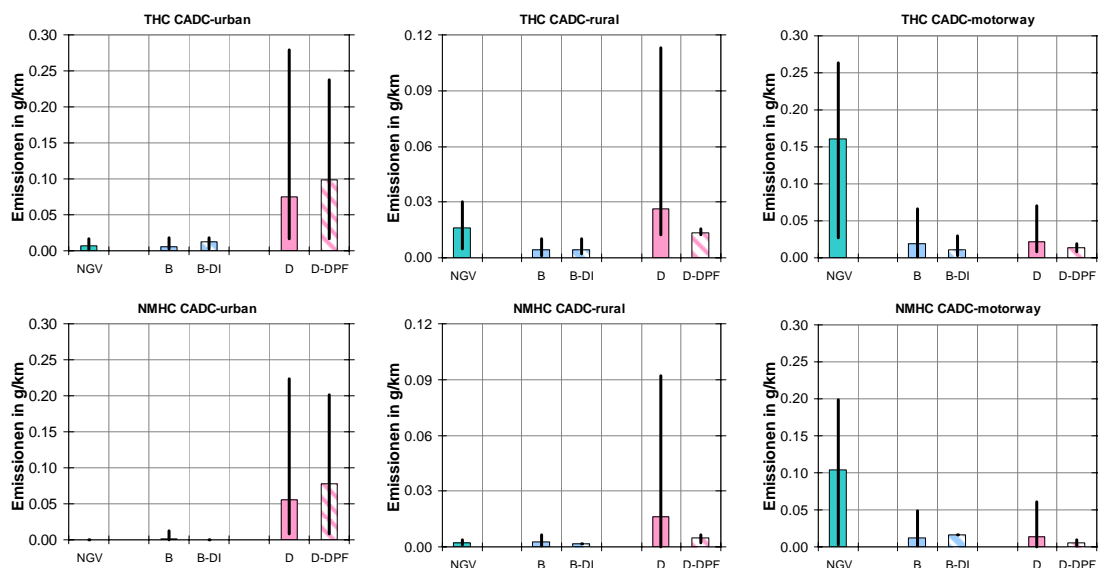


Abb. 14 Gesamt-Kohlenwasserstoffe T.HC (obere Reihe) und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe NMHC (untere Reihe) im Artemis-Fahrzyklus

Die ozonreaktiven NMHC-Emissionen der verschiedenen Antriebskonzepte weisen nur im städtischen Zyklusteil einen statistisch gesicherten Unterschied auf. Dort weisen die Dieselfahrzeuge höhere Emissionen auf als Benzin- und Erdgasfahrzeuge. Im Überland- und Autobahnzyklusteil überschneiden sich die Streubereiche, weshalb kein signifikanter Unterschied vorliegt. Auffallend ist der Anstieg der T.HC- und NMHC-Emissionen eines Teils der Erdgasfahrzeuge im Autobahn-Zyklusteil. Dies ist – wie der Anstieg bei den Partikelemissionen in diesem Betriebsbereich – auf den Einsatz nicht optimierter Technologie zurückzuführen. Der Streubereich zeigt bei allen Antriebskonzepten, dass es in der gleichen Vergleichsgruppe Fahrzeuge mit NMHC-Emissionen an der „Nullgrenze“ und solche mit deutlich höheren Emissionen gibt.

### 5.3.2 Stickoxide

Die Stickoxidemissionen von Verbrennungsmotoren bestehen hauptsächlich (>90%) aus Stickstoffmonoxid (NO). Der Rest ist Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>). NO und NO<sub>2</sub> werden als Stickoxide (NO<sub>x</sub>) zusammengefasst. Bei Dieselfahrzeugen erhöht sich der NO<sub>2</sub>-Anteil aufgrund der katalytischen Abgasnachbehandlung unter Sauerstoffüberschuss (Umwandlung von NO zu NO<sub>2</sub>). Bei Benzin- und Erdgasfahrzeugen tritt diese NO<sub>2</sub>-Erhöhung nicht auf, weil die Abgasnachbehandlung nicht unter Sauerstoffüberschuss abläuft.

Um die Stickoxide hinsichtlich der lokalen Ozonbildung korrekt beurteilen zu können, müssen nicht die reglementierten NO<sub>x</sub>-Emissionen, sondern die NO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet werden. Im NEFZ sieht dies folgendermassen aus:

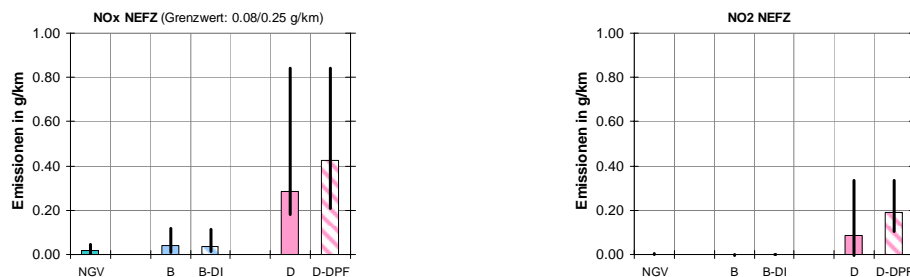


Abb. 15 Stickoxidemissionen NO<sub>x</sub> (linkes Diagramm) und Stickstoffdioxidemissionen NO<sub>2</sub> (rechtes Diagramm) im NEFZ

Erdgas- und Benzinfahrzeuge weisen im Mittel statistisch gesichert rund 10 Mal niedrigere NO<sub>x</sub>-Emissionen und praktisch keine NO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Der NO<sub>2</sub>-Anteil der Dieselfahrzeuge liegt bei 20%, bei den Dieselfahrzeugen mit Partikelfilter bei 45%.

Im Artemis-Zyklus zeigt sich folgendes Bild:

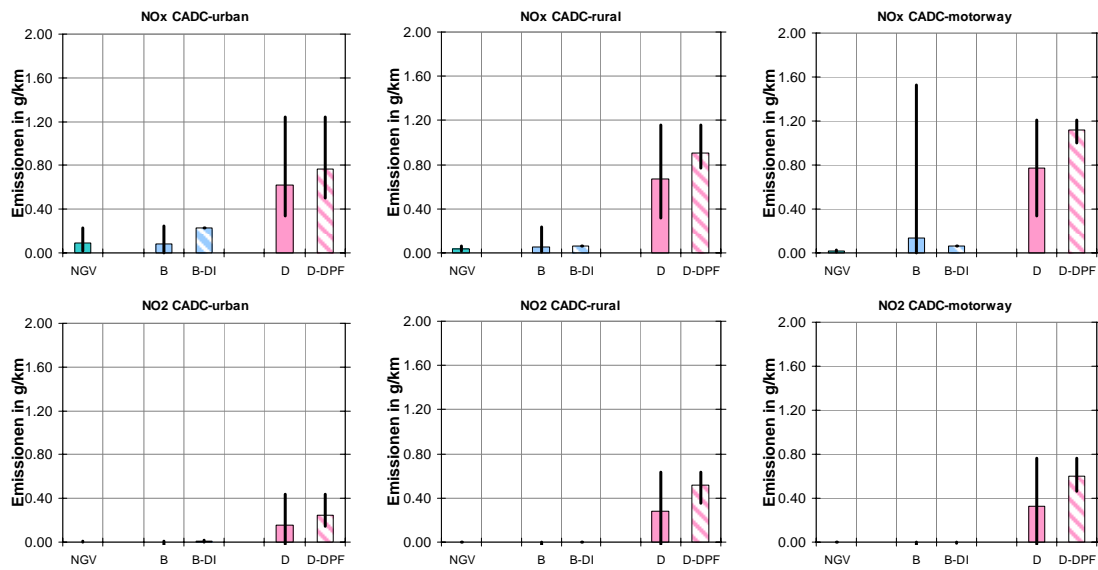


Abb. 16 Stickoxidemissionen  $\text{NO}_x$  (obere Reihe) und Stickstoffdioxidemissionen  $\text{NO}_2$  (untere Reihe) im Artemis-Fahrzyklus

Die Erdgas- und Benzinfahrzeuge weisen auch im realitätsnahen Artemis-Fahrzyklus keine  $\text{NO}_2$ -Emissionen auf. Die Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter weisen hier im Mittel einen  $\text{NO}_2$ -Anteil von 35-40% auf und die Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter von gut 50%. An der Entwicklung von Partikelfiltertechnologien für Dieselfahrzeuge, die zu keiner Erhöhung der  $\text{NO}_2$ -Emissionen führen, wird derzeit intensiv gearbeitet.

## 5.4 Treibhausgasemissionen

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Fahrzeuges hängen vom Kohlenstoffgehalt der Treibstoffe und vom Treibstoffverbrauch ab. Der Kohlenstoffgehalt von Benzin und Diesel beträgt ca. 87 mass-%, derjenige von Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas ca. 75 mass-%. Der Treibstoffverbrauch seinerseits hängt vom Energieinhalt des Treibstoffes ab. Erdgas hat mit ca. 47 MJ/kg einen höheren spezifischen Energieinhalt als Benzin oder Diesel mit ca. 43 MJ/kg. Zudem ermöglicht die hohe Klopfestigkeit von Erdgas etwas höhere Wirkungsgrade als dies bei Benzinmotoren der Fall ist. Aufgrund der schwereren Erdgaspeicherung nimmt aber die Masse von Erdgasfahrzeugen zu, was sich wiederum erhöhend auf den Verbrauch auswirkt.

Im Gegensatz zu den Abgasemissionen, wo die Fahrzeuggröße und die Fahrzeugart praktisch keinen Einfluss ausüben, hängen Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen stark von den individuellen Fahrzeugspezifikationen ab. Da die Fahrzeuge der Vergleichsgruppen hier nicht ohne weiteres vergleichbar sind, werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen einer breit abgestützten Studie der Mineralöl- und Automobilindustrie und der Europäischen Kommission übernommen<sup>9</sup> (Mittelwerte der Angaben für 2002 und 2010). Die Zahlen basieren auf einer Modellrechnung für den offiziellen Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ, in der systematische, treibstoffbedingte Unterschiede berücksichtigt wurden.

Da Methan eine 21 Mal stärkere Treibhausgaswirkung aufweist als CO<sub>2</sub>, muss dieses insbesondere bei einem Vergleich, in dem auch Erdgasfahrzeuge teilnehmen, berücksichtigt werden. Dies wird durch Umrechnung der Methanemissionen in eine „CO<sub>2</sub>-Wirkung“ gemacht und dann zusammen mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen als CO<sub>2</sub>-Äquivalent bzw. Treibhausgasemissionen ausgedrückt (Abb. 17, rechtes Diagramm).

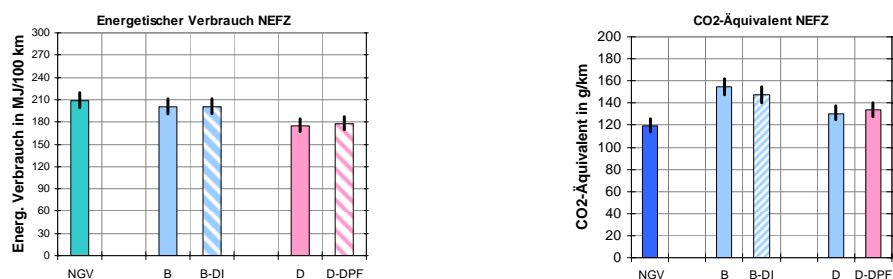


Abb. 17 Energetischer Verbrauch (rechtes Diagramm) und Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalent der CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Emissionen) im offiziellen Neuen Europäischen Fahrzyklus (Quelle: Concawe, EUCar, EU-Kommission)

<sup>9</sup> Concawe, EUCar, European Commission; Well-to-wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context, Version 2b, May 2006

Erdgasfahrzeuge weisen im Zeitraum bis 2010 gegenüber Benzinfahrzeugen einen energetischen Mehrverbrauch von ca. 4% und gegenüber Dieselfahrzeugen von ca. 17% auf. Die Treibhausgasemissionen von Erdgasfahrzeugen liegen aber trotzdem 21% unter denjenigen von Benzin- und 11% unter denjenigen der Dieselfahrzeuge. Die Methanemissionen der Erdgasfahrzeuge machen umgerechnet in ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent im Mittel weniger als 1% der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus.

## 5.5 Gesamtbeurteilung

Aus ökologischer Sicht ergibt sich folgende Gesamtbeurteilung, die betriebliche oder ökonomische Aspekte jedoch nicht berücksichtigt:

Erdgasfahrzeuge weisen insbesondere beim Einsatz in städtischen Regionen eine geringere Luftbelastung auf als Benzin- oder Dieselfahrzeuge. Folgende Gründe haben zu dieser Beurteilung geführt:

- Die Emissionen an Treibhausgasen sind deutlich niedriger als bei Benzin- oder Dieselfahrzeugen. Zudem können Erdgasfahrzeuge ohne Umstellung mit allen Mischungsverhältnissen mit aufbereitetem Biogas betrieben werden. Aufbereitetes Biogas (z.B. Kompogas) ist dem Erdgas chemisch gleichwertig.
- Die ozonbildenden und teilweise giftigen Abgaskomponenten NO<sub>2</sub> und NMHC liegen generell auf sehr niedrigem Niveau. Die Partikelemissionen liegen im Bereich der ebenfalls sehr sauberen Benzin- und Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter. Das gute Emissionsverhalten ist insbesondere beim Einsatz in städtischen Bereichen, wo die Luftbelastung am problematischsten ist, festzustellen. Bei hohen Lasten (d.h. Geschwindigkeiten über 120 km/h) treten bei einem Teil der Erdgasfahrzeuge dann aber signifikant höhere Emissionen auf, die auf den Einsatz von noch nicht optimaler Technologie zurückzuführen sind.

Benzinfahrzeuge ihrerseits weisen ebenfalls sehr niedrige ozonbildende und giftige Abgasbestandteile auf. Die für die Klimaerwärmung verantwortlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen aber doch deutlich höher als bei Erdgas- oder Dieselfahrzeugen. Der Einsatz von Biotreibstoffen (Ethanol) ist bei niedrigen Beimischungsraten ohne Umstellung möglich. Ethanol ist chemisch nicht das gleiche wie Benzin und erfordert bei höheren Beimischungen Anpassungen am Fahrzeug.

Dieselfahrzeuge weisen den niedrigsten energetischen Verbrauch auf. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind höher als diejenigen von Erdgasfahrzeugen und niedriger als diejenigen von Benzinfahrzeugen. Die Emission von ozonreaktiven und zum Teil giftigen Abgaskomponenten ist aber doch generell deutlich höher als bei Erdgas- oder Benzinfahrzeugen. Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter müssen aus ökologischer Sicht insbesondere beim Einsatz in städtischen Bereichen als bedenklich eingestuft werden.

## 6 Anhang

Im Folgenden sind die 32 Fahrzeuge aufgelistet, die an der Messung teilgenommen haben:

### **Benzinfahrzeuge**

- Ford Mondeo 2.5
- Audi A4 3.0
- Seat Ibiza 1.2
- VW Polo 1.0
- Audi A3 1.6
- Mazda 3 2.0
- Opel Zafira 2.2
- Mercedes-Benz S 350 L 3.7
- Opel Astra 1.4
- VW New Beetle 1.6
- Volvo XC90 2.5
- Opel Corsa 1.8
- VW Passat 2.0
- BMW 330i 3.0

### mit Direkteinspritzung:

- VW Touran FSI 1.6
- Toyota Avensis 2.0

### **Dieselfahrzeuge**

- Opel Meriva 1.7
- VW Touran 2.0
- Opel Corsa 1.2
- Audi A3 2.0
- Seat Altea 2.0
- Honda Accord 2.2
- VW Golf 1.9

### mit Partikelfilter:

- Toyota Avensis 2.0
- Opel Vectra
- VW Passat
- Peugeot 307 2.0
- Mercedes A 180 2.0
- BMW 530 3.0

### **Erdgasfahrzeuge**

- VW Touran Ecofuel
- Fiat Multipla Bifuel
- Opel Zafira CNG