

Nachführung der Emissionsgrundlagen Strassenverkehr

Ergänzung der Messdaten auf das Bezugsjahr 2000

Zweiräder

Standardprogramm

Autoren

Ana-Marija Vasic

Martin F. Weilenmann

Gruppe Motorfahrzeuge

Abteilung Verbrennungsmotoren/Feuerungen

Christian Saxer

Peter Mattrel

Gruppe Katalytische Prozesse

Laboratorium für Organische Chemie

EMPA Dübendorf

Im Auftrag des

Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

Sektion Verkehr

Projektleiter

Prüfstandsmessungen

Prüfstandsauswertungen

CI-MS-Analytik

GC-Analytik

Dr. Martin Weilenmann

Roland Lüscher

Alfred Mack

Claudio Rüdy

Ana-Marija Vasic

Delia Ajtay

Anna-Maria Forss

Christian Saxer

Dr. Norbert Heeb

Erika Gujer

Peter Mattrel

Dübendorf, den 29. Januar 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Projektbeschrieb	8
2.1	Einführung	8
2.2	Ziele	8
2.3	Fahrzeugauswahl	9
2.4	Prüfzyklen	10
2.4.1	Nomenklatur	10
2.4.2	Zyklus UDC	11
2.4.3	Zyklus FHB	12
2.4.4	Zyklus CADC	12
2.4.5	Zyklus WMTC Version 8	12
2.4.6	Zyklus Scooter cold start	13
2.4.7	Zyklus Motorbike cold start	13
2.4.8	Merkmale der Prüfzyklen	14
2.5	Durchgeführte Versuche	15
2.6	Messtechnik und Aufbereitung der Messdaten	16
2.6.1	Messaufbau / Probenahme	16
2.6.2	Bagmessungen	17
2.6.3	Zeitaufgelöste Messungen	17
2.7	Entstehung und Wirkung von Schadstoffen	17
2.7.1	NO _x -Emissionen	18
2.7.2	HC-Emissionen	18
2.7.3	CO-Emissionen	19
2.7.4	CO ₂ -Emissionen	20
2.7.5	Methan-Emissionen (CH ₄)	20
2.7.6	Benzol-Emissionen (C ₆ H ₆)	21
2.7.7	Toluol-Emissionen (C ₇ H ₈)	21
2.7.8	C ₂ -Benzol-Emissionen (C ₈ H ₁₀)	22
2.7.9	Katalytische Abgasnachbehandlung	22
3	Auswertung	24
3.1	Vergleich der Bagwerte mit den integrierten Werten	24
3.1.1	Limitierte Schadstoffe (CO, HC, NO _x , CO ₂)	24
3.1.2	Nichtlimitierte Schadstoffe	25
3.2	Limitierte Schadstoffe (CO, HC, NO _x , CO ₂)	26
3.2.1	Legislativer Zyklus	26
3.2.2	Reale Zyklen mit warmem Motor	28
3.2.3	Vergleich Zweiräder mit Personenwagen	32
3.2.4	Kaltstart-Zyklen	36
3.3	Schadstoffberechnung mit Emissionsmodell	43
3.3.1	Zweck und Aufbau des Modells	43
3.3.2	Validierung, Vergleich berechneter und gemessener Emissionsfaktoren	44

3.4	Benzolemissionen in realen Zyklen (C ₆ H ₆)	49
3.4.1	Benzolemissionen im CADC-Zyklus (warm).....	49
3.4.2	Benzolemissionen in den Zyklen SC und MC (kalt)	50
3.5	Methan in realen Zyklen.....	53
3.5.1	Methan im CADC-Zyklus (warm)	53
3.5.2	Methanemissionen in den Zyklen SC und MC (kalt).....	54
3.6	Partikel.....	56
3.6.1	Messergebnisse	57
3.7	Ozonbildungspotential	60
3.7.1	Ozonbildungspotential und spezifische Reaktivität	60
3.7.2	Messverfahren.....	60
3.7.3	Messergebnisse	61
4	Anhang.....	63
4.1	Treibstoffanalyse	63
4.2	Messprinzipien.....	64
4.2.1	Messung von NO _x	64
4.2.2	Messung von HC	64
4.2.3	Messung von CO	64
4.2.4	Messung von CO ₂	64
4.2.5	Messung mit Chemischer Ionisations Massenspektrometrie (CI-MS).....	64
4.3	Prüfzyklus UDC	66
4.4	Prüfzyklus FHB	66
4.5	Prüfzyklus CADC	67
4.6	Prüfzyklus WMTC	67
4.7	Prüfzyklus Scooter cold start.....	68
4.8	Prüfzyklus Motorbike cold start	68
4.9	Bagwerte.....	69
4.10	Integralwerte.....	72
4.11	Distanzen.....	74
4.12	Partikel	75
4.13	Benzol, Toluol, C ₂ -Benzole und Methan.....	76
4.14	Benzol/HC- und Methan/HC-Verhältnisse	78
4.15	Ozonbildungspotential.....	79
5	Referenzen.....	92

1 Zusammenfassung

Das BUWAL Projekt „Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz 1950-2020“ hat das Ziel, die Entwicklung der Emissionen und des Treibstoffverbrauchs zu quantifizieren. Basis dafür ist die Einteilung der Strassenfahrzeuge in Fahrzeugschichten (Zweiräder, Personenwagen, Lieferwagen, Benzin, Diesel usw.) und der Fahr-situation (innerorts, ausserorts, Autobahn; frei, Kolonne, Stau, Steigung usw.) in Fahr-muster. Darauf folgt die Ermittlung von Emissionsfaktoren für jede Schicht für ver-schiedene Fahrmuster. Um die Datenbasis zu aktualisieren, hat die EMPA acht Zweirä-der der Legislaturstufen FAV3 und 97/24/EG ausgewählt und gemessen. Die Fahrzeu-ge wurden von Privatleuten zur Verfügung gestellt und ungewartet direkt aus dem Verkehr auf den Rollenprüfstand gebracht.

Zwei der acht Fahrzeuge besaßen einen geregelten 3-Wege-Katalysator, zwei weitere waren mit 2-Takt-Motoren ausgerüstet. Die Fahrzeuge wurden im legislativen Zyklus für Zweiräder und in mehreren realen Zyklen gemessen, die das Fahrverhalten auf der Strasse repräsentieren und in Abschnitte innerorts, ausserorts und Autobahn gegliedert werden. Drei Gruppen von Schadstoffen wurden erfasst:

- Es interessierten die limitierten Schadstoffe CO, HC, NO_x und CO₂. Für letzteren existiert zwar kein Grenzwert, da aber ein direkter Zusammenhang zum Treib-stoffverbrauch besteht, wird CO₂ in diesem Bericht zusammen mit den limitierten Schadstoffen diskutiert.
- Daneben wurden auch nichtlimitierte Emissionen wie Benzol, Toluol, C₂-Benzole und Methan gemessen. Auch der Partikelaustritt, obwohl bei benzinbetriebenen Fahrzeugen üblicherweise von untergeordnetem Interesse, wurde für die Zwei-räder gemessen.
- Schliesslich wurden in einem Offline-Verfahren sämtliche Kohlenwasserstoffe im Abgas analysiert (über 150 Komponenten) und daraus das Ozonbildungspotential bestimmt.

Den legislativen Zyklus haben fünf Fahrzeuge wegen zu hohen CO- und HC-Emissionen nicht bestanden. Bei den realen Zyklen stimmten die Emissionen vergleich-barer Fahrsituationen (innerorts, ausserorts, Autobahn) allgemein gut überein. Die auf die gefahrene Strecke bezogenen Emissionen waren innerorts am höchsten. Dies liegt einerseits an der hohen Dynamik dieser Phase, andererseits befinden sich die Fahrzeuge innerorts häufig im Leerlauf, und die Emissionen dieser Zeitabschnitte werden auf die gefahrene Strecke aufgeschlagen. Um den Kaltstartzuschlag zu bestimmen, wurden die Zweiräder in repetitiven Zyklen gefahren und die Abschnitte mit kaltem Motor mit denen bei betriebswarmem verglichen. Solche Messungen fanden bei Umgebungstempera-turen von 23 °C und 5 °C statt, womit Sommer- und Winterkaltstarts getestet wurden. Dabei stellte sich erstaunlicherweise heraus, dass im Kaltstart bei 23 °C mehr Schadstof-fe emittiert werden als bei 5 °C.

Die Zweiräder wurden bezüglich den limitierten Schadstoffen mit Personenwagen verglichen. Die Zwei- und die unregulierten Viertakter schnitten gegenüber benzinbetriebenen Personenwagen der Stufe Euro-0, also Fahrzeugen ohne Katalysator, in den CO- und HC-Emissionen schlechter ab. Die Motorräder mit geregelterm 3-Wege-Katalysator hingegen hatten tiefere CO- und HC-Emissionen als die Euro-0 PW. Im Vergleich mit Personenwagen der Stufe Euro-3 (im Verkehr seit dem Jahr 2000) schnitten alle Zweiräder in allen limitierten Schadstoffen deutlich schlechter ab.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts der Europäischen Union wurde an der EMPA ein Fahrzeugmodell erstellt, mit dem Emissionen nicht gefahrener Zyklen berechnet werden können. Um die Qualität des Modells zu prüfen, wurden gefahrene Zyklen simuliert, und die Ergebnisse der Simulation wurden mit den gemessenen Emissionen verglichen. Die Vorhersagequalität des Modells war etwas schlechter als bei Euro-0 Personenwagen, was sich mit der hier angewandten Messtechnik begründen lässt.

Ein Motorrad mit geregelterm 3-Wege-Katalysator hatte in der Simulation des legislativen Zyklus deutlich höhere Emissionen, als sie tatsächlich gemessen wurden. Daraus konnte geschlossen werden, dass dieses Fahrzeug vermutlich den legislativen Zyklus auf dem Prüfstand erkannt hat (cycle-beating).

Im Sekundentakt wurden die Emissionen der Schadstoffe Methan, Benzol, Toluol und C₂-Benzole mittels Chemischer Ionisations-Massenspektrometrie (CI-MS) erfasst. Den Emissionen von Benzol, einer krebserregenden Substanz der Giftklasse 1K, gilt eine besondere Beachtung, da kein Schwellwert definiert werden kann, unterhalb dessen keine Gesundheitsgefährdung besteht. Die aktuelle Belastung der Schweizer Bevölkerung durch Benzol führt zu einem Leukämierisiko, das das Schutzziel der Umweltschutzgesetzgebung um das Zwanzigfache übersteigt.

Die vorliegenden Daten belegen, dass der Benzolaustritt von Zweirädern einen relevanten Beitrag an die Aussenluftbelastung liefert. Verglichen mit benzinbetriebenen Personenwagen der Euro-3-Technologie emittieren Motorräder ein Vielfaches an Benzol. Im Zyklus CADC erreichen die Personenwagen Benzol-Emissionsfaktoren von 0.3, 1.6 und 3.1 mg/km für die Phasen ‚innerorts‘, ‚ausserorts‘ und ‚Autobahn‘. Die Zweiräder emittieren in den drei Phasen des CADC etwa 1500, 100 und 10 Mal mehr Benzol als die PW. Zudem wurde festgestellt, dass auch bei Zweirädern die Einführung der Katalysator-Technologie zu einer Erhöhung der Verhältnisse von Methan zu HC resp. Benzol zu HC führt.

An den Fahrzeugen wurden in allen Zyklen Messungen von Partikeln durchgeführt. Im Allgemeinen bewegte sich die Partikelemission der Zweiräder im Bereich des Ausstosses von dieselbetriebenen Personenwagen der Stufe Euro-2. Dabei wurde jedoch nicht zwischen Russpartikeln und Öltröpfchen unterschieden. Bei den Zweitaktern wurde erwartungsgemäss der grösste Partikelaustritt festgestellt. Gemäss [1] bestehen die Partikel der Motorräder weitgehend aus Öl.

Das Abgas der Zweiräder wurde auch auf sein Ozonbildungspotential untersucht. Flüchtige organische Verbindungen bilden durch photochemische Reaktionen mit Stickoxiden (NO_x) den sekundären Luftschadstoff Ozon. Die Messungen zeigten, dass das Kohlenwasserstoffgemisch im Auspuff der Zweiräder ein durchschnittlich 7% höheres Ozonbildungspotential aufweist als jenes moderner Personenwagen.

2 Projektbeschreibung

2.1 Einführung

Im Rahmen eines internationalen Projekts der Schweiz, Deutschlands und Österreichs (D.A.CH-Kooperation) wurden in den Neunzigerjahren Emissionsfaktoren von rund 40 Zweirädern erfasst und in das Handbuch Emissionsfaktoren integriert. Die Verfahren und Ergebnisse sind in [2] und [3] enthalten.

Dabei wurde gezeigt, dass weder legislative Testzyklen noch solche von Personenwagen geeignet sind, die bei Zweirädern in der Realität entstehenden Emissionen auf dem Prüfstand nachzubilden. Ausserdem stellte sich heraus, dass kleine Roller mit einem Hubraum unter 125 ccm in anderen Zyklen getestet werden müssen als Motorräder mit vergleichsweise grossem Hubraum.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, die bestehende Datensammlung mit Werten für neuere Modelle zu ergänzen. Die Emissionen verschiedener Zweiräder wurden in unterschiedlichen Zyklen in Anwendung der genannten Erkenntnisse gemessen.

Es ist bekannt, dass ein Motorstart in kaltem Zustand höhere Emissionen als im betriebswarmen verursacht. Kaltstarts im Winter wurden in [4] untersucht. Sommerkaltstarts wurden von der Fachhochschule Biel gemessen und in [5] dokumentiert. In Ergänzung dazu wurden für die vorliegende Arbeit an zwei Fahrzeugen sowohl Sommer- als auch Winterkaltstarts durchgeführt.

Neben den limitierten wurden auch nichtlimitierte Schadstoffe wie Partikel, Benzol, Methan, Toluol und C₂-Benzole gemessen. Das Ozonbildungspotential des Abgases von Zweirädern war dabei von besonderem Interesse. Deshalb wurde auch die Gesamtheit der flüchtigen organischen Verbindungen gemessen und auf ihr Potential zur Bildung von Ozon untersucht.

2.2 Ziele

Für die vorliegende Arbeit wurden Emissionen einer repräsentativen Flottenstichprobe von acht Zweirädern in verschiedenen Zyklen gemessen. Folgende Ziele wurden dabei verfolgt:

- Erfassung von Emissionsfaktoren während des Betriebs des Fahrzeugs in verschiedenen Zyklen.
- Untersuchung des Kaltstarts bei 23 °C (Sommerkaltstart).
- In Ergänzung zu den Sommerkaltstarts der Fachhochschule Biel in [5]: Untersuchung des Kaltstarts bei 5 °C (Winterkaltstart) für zwei Fahrzeuge in einem Zyklus.
- Messung nicht reglementierter Schadstoffe (Partikel, Benzol, Methan, Toluol, C₂-Benzole, flüchtige organische Verbindungen) und deren Untersuchung auf ihr Ozonbildungspotential.

2.3 Fahrzeugauswahl

Im Rahmen der Nachführung der Emissionsgrundlagen des Strassenverkehrs wurden acht Zweiräder vermessen, die als Stichprobe bezüglich Hubraum, Motorkonzept (Zwei- oder Viertakter) und Abgasnachbehandlungssystem für die Fahrzeugflotte repräsentativ sind. Die Fahrzeugauswahl geschah in Absprache mit dem europäischen Projekt ARTEMIS¹ und ergänzt die dortige Datenbasis.

Die beiden Legislaturstufen FAV3 und 97/24/EG werden hier zusammen untersucht, weil sie sich sehr stark gleichen und die Fahrzeuge keine technisch relevanten Unterschiede aufweisen. Die Eigenschaften der ausgewählten Zweiräder sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt. Die Bezeichnung der Fahrzeuge entspricht folgendem Muster:

- 1. Zeichen: S für Scooter, M für Motorrad
- 2. Zeichen: Z für Zweitakter, V für Viertakter
- 3. Zeichen: 7 für legislative Stufe 97/24/EG, F für legislative Stufe FAV3
- 4. und 5. Zeichen: Fahrzeugnummer

Die Nummerierung der Fahrzeuge beginnt bei 3, weil die in [4] untersuchten Fahrzeuge die Nummern 1 und 2 tragen.

Fzg-Nr.	SZ7-03	SZF-04	SV7-05	SV7-06
Marke und Modell	Yamaha YN 50	Piaggio Skipper	Piaggio Vespa	Yamaha YP 250
Typ	Roller	Roller	Roller	Roller
1. Inbetriebnahme	1998	1995	1997	1996
Emissionsklasse	97/24/EG	FAV3	97/24/EG	97/24/EG
Hubraum [ccm]	49	124	124	250
Arbeitsweise (Anzahl Takte)	2	2	4	4
Vergaser/Einspritzung	Vergaser	Vergaser	Vergaser	Vergaser
Choke	automatisch	automatisch	automatisch	automatisch
Abgasnachbehandlung	Oxi-Kat	Oxi-Kat	nichts	nichts
Getriebe	Variomat	Variomat	Variomat	Variomat
max. Leistung [kW]	2.9	9.5	7.9	14.7
bei Drehzahl [U/min]	6250	7250	7700	6500
max. Geschwindigkeit [km/h]	64	99	93	120
Laufleistung [km]	11'222	15'472	13'951	22'724
Kühlung	Luft	Luft	Luft	Wasser
Gewicht [kg]	88	113	113	170

Tabelle 1: Stichprobe Roller

¹Das Ziel des europäischen Projekts ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) ist die Entwicklung eines Emissionsmodells, das eine Schätzung von Emissionen auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene ermöglicht. Weitere Informationen sind unter <http://www.trl.co.uk/artemis/index.htm> erhältlich.

Fzg-Nr.	MVF-07	MVF-08	MV7-09	MV7-10
Marke und Modell	Honda Shadow	Suzuki VS 800 GLP	Honda VFR 800 FI	BMW R1150GS
Typ	Motorrad	Motorrad	Motorrad	Motorrad
1. Inbetriebnahme	1993	1993	1998	1999
Emissionsklasse	FAV3	FAV3	97/24/EG	97/24/EG
Hubraum [ccm]	583	805	782	1130
Arbeitsweise (Anzahl Takte)	4	4	4	4
Vergaser/Einspritzer	Vergaser	Vergaser	Einspritzung	Einspritzung
Choke	manuell	manuell	kein	kein
Abgasnachbehandlung	nichts	Sekundärluftvent.	3-W-Kat	3-W-Kat
Getriebe	4 Gänge	5 Gänge	6 Gänge	6 Gänge
max. Leistung [kW]	15.5	29.4	70	62
bei Drehzahl [U/min]	4500	5000	10500	6750
max. Geschwindigkeit [km/h]	125	155	250	195
Laufleistung [km]	5'364	29'466	32'223	31'474
Kühlung	Wasser	Wasser	Wasser	Luft / Öl
Gewicht [kg]	213	219	237	277

Tabelle 2: Stichprobe Motorräder

2.4 Prüfzyklen

2.4.1 Nomenklatur

Die Nomenklatur bezüglich Prüfzyklen ist in der Literatur nicht einheitlich, es herrscht ein Durcheinander verschiedener Bezeichnungen. In diesem Bericht werden die nachfolgend beschriebenen Bezeichnungen verwendet.

Fahrkurve

Eine Geschwindigkeits-Zeitreihe $v(t)$, welche aus Messungen stammt oder künstlich für Messfahrten erzeugt wird.

Fahrmuster

Die Fahrkurven werden aufgrund verschiedener Kennzahlen Fahrmustern zugeordnet. Die grobstmögliche Unterteilung der Fahrmuster ist innerorts, ausserorts und Autobahn. Feinere Unterteilungen z.B. nach Topographie und Verkehrsdichte sind üblich. Jede Fahrkurve wird genau einem Fahrmuster zugeordnet.

Zyklus

Als Zyklus wird die gesamte Geschwindigkeits-Zeitreihe bezeichnet, die während einer Messung auf dem Prüfstand mit dem Fahrzeug gefahren wird. Ein Zyklus ist eine Kombination von Fahrkurven. Dabei werden häufig verschiedene Kurven aneinandergereiht, aber auch eine Repetition derselben Kurve ist denkbar. Üblicherweise besteht ein Zyklus aus drei Teilzyklen (Fahrmustern, Bags, Phasen).

Bag

Ein Teil des Abgasstromes wird in Säcke, sog. Bags, abgefüllt. Während eines Zyklus werden in der Regel drei Bags gefüllt. Nach der Messung werden die Inhalte der Bags analysiert, um daraus die kumulierten Emissionen zu erhalten. Mit Kenntnis der Länge der gefahrenen Strecke werden aus den Bags Emissionsfaktoren in g/km bestimmt. Prüfstände sind normalerweise so ausgerüstet, dass während einer Messfahrt drei Bags nacheinander gefüllt werden können, d.h. es lassen sich drei Teilzyklen analysieren.

Modaldaten

Bei den Messungen auf dem Prüfstand werden die Emissionen neben anderen Grössen unmittelbar (instantaneous measurement) mit einer Rate von 10 Werten pro Sekunde aufgezeichnet. Diese zeitaufgelösten Daten werden Modaldaten genannt. Während mit Bags kumulierte Emissionen gemessen werden, geben die Modaldaten Auskunft über deren zeitlichen Verlauf. Durch Integration der Modaldaten können ‚Bagwerte‘ (Emissionsfaktoren in g/km) beliebiger Abschnitte gewonnen werden.

Sub-Bag

In unterschiedlichen Fahrkurven sind z.T. gleiche Geschwindigkeitsverlauf-Stücke zu finden, oder in einigen Fahrkurven sind Wiederholungen eingebaut. Dabei können Vergleiche sogenannter Sub-Bags von Interesse sein. Diese Sub-Bag Daten werden aus den zeitaufgelösten Emissionsdaten (Modaldaten) numerisch aufintegriert.

Für die hier vorgestellte Untersuchung wurden bekannte und z.T. neu entwickelte Fahrkurven verwendet. Neben einer gesetzlichen Fahrkurve sind sog. "Real-World"-Zyklen gefahren worden, welche aus einer statistischen Auswertung von Fahrverhaltensuntersuchungen des täglichen Verkehrs synthetisiert wurden und typische Fahrmuster innerorts, ausserorts und auf Autobahnen abbilden. Die Messungen fanden, bis auf die Winterkaltstart-Tests an zwei Fahrzeugen, bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C statt.

2.4.2 Zyklus UDC

Für die Typenprüfung von Motorrädern nach Euro-2-Norm werden sechs Wiederholungen des ECE-R 40-Zyklus gefahren. Die ersten beiden Wiederholungen dienen nur dem Warmfahren des Motors. Die eigentliche Abgasmessung findet während den anschliessenden vier ECE-R 40-Zyklen statt. Diese entsprechen dem UDC (urban driving cycle, Innerortsteil) des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) für PW, weshalb der Name übernommen wurde. Der UDC wurde von allen gemessenen Zweirädern gefahren.

Selbst für Personenwagen ist die Entwicklung realer und auf dem Prüfstand fahrbarer Zyklen schwierig. Für Zweiräder, die stärker in Ausführung, Leistung, Gewicht usw. variieren, ist dies noch anspruchsvoller. Aus diesem Grund werden zum Teil für die

Messung von Zweirädern etwas modifizierte Personenwagenzyklen verwendet. Der ECE-R 40 bzw. UDC ist ein Kompromiss, der auch von den kleinsten Zweirädern auf Rollenprüfständen gefahren werden kann. Es ist ein synthetisch erstellter Zyklus mit Konstantfahrten, wie sie in der Realität nicht vorkommen.

Da grössere Zweiräder anders betrieben werden als kleine, wurden von verschiedenen Labors reale Zyklen für Motorräder entwickelt, die unterschiedliche Hubraumgrössen berücksichtigen. Für die Messungen des vorliegenden Berichts wurden die nachfolgenden realen Zyklen gefahren.

2.4.3 Zyklus FHB

Dieser reale Zyklus wurde an der Fachhochschule Biel speziell für Zweiräder entwickelt und setzt sich zusammen aus den drei Teilzyklen ‚Zentrum‘, ‚Peripherie‘ und ‚Überland‘ [6].

‚Zentrum‘ repräsentiert eine reale Fahrt im Zentrum der Stadt Biel. Zusammen mit dem Teilzyklus ‚Peripherie‘ wird eine reale Innerortsfahrt dargestellt. Der ‚Überland‘-Teil repräsentiert eine reale Ausserortsfahrt. Der Zyklus beginnt mit betriebswarmem Motor und wurde mit allen Fahrzeugen nachgefahren.

2.4.4 Zyklus CADC

Der Common ARTEMIS Driving Cycle ist ein realer Zyklus, der im Rahmen des europäischen ARTEMIS-Projekts entwickelt wurde [7]. Er repräsentiert ein durchschnittliches europäisches Fahrverhalten für Personenwagen und ist eher dynamisch. Mit Rücksicht auf die Messungen bei den ARTEMIS-Partnern wurde die langsame Autobahn-Variante mit maximaler Geschwindigkeit von 130 km/h benutzt. Dieser Zyklus setzt sich aus einem Innerorts-, Ausserorts- und Autobahn-Teilzyklus zusammen. Er wurde mit betriebswarmem Motor gemessen. Jedes Fahrzeug wurde in jenen Teilzyklen gefahren, denen es auf Grund seiner Leistung folgen konnte.

2.4.5 Zyklus WMTC Version 8

Der World Motorcycle Test Cycle wurde mit dem Ziel entwickelt, den aktuellen legislativen Zyklus für Motorräder, den UDC, durch einen realen und weltweit einheitlichen Zyklus zu ersetzen. Der Zyklus besteht aus einem Innerorts-, Ausserorts und Autobahn-teil (Phasen 1 bis 3). Je nach Leistungsklasse des Zweirads werden die verschiedenen Phasen unterschiedlich gewichtet. Da der WMTC jedoch noch nicht verbindlich ist, wurde diese Gewichtung für die vorliegenden Messungen unterlassen. Gemäss [8] ist dieser Zyklus zwar real, wurde jedoch gegenüber der Wirklichkeit auf der Strasse in seiner Dynamik abgeschwächt, um ihn auf verschiedensten Rollenprüfständen fahrbar zu machen.

Dieser Zyklus wurde von vier Fahrzeugen gefahren. Bei allen begann Phase 1 mit einem Kaltstart. Anschliessend an Phase 2 wurden zwei Fahrzeuge in Phase 3 getestet. Abschliessend wurde jedes Zweirad nochmals in Phase 1 mit einem Warmstart gemessen.

2.4.6 Zyklus Scooter cold start

Dieser Zyklus besteht aus einer dreifachen Wiederholung des verkürzten Zentrum-Teils des FHB-Zyklus. Damit wurden die drei kleinsten Roller gemessen (Fahrzeuge 3, 4 und 5).

2.4.7 Zyklus Motorbike cold start

Für diesen Zyklus wird der Ausserortsteil des WMTC etwas verkürzt und drei Mal wiederholt. Gemessen wurden der grösste Roller (Fahrzeug 6) und die vier Motorräder (Fahrzeuge 7 bis 10) mit einem Kaltstart bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C. Zusätzlich wurden die Fahrzeuge 6 und 7 (grösster Roller und kleinstes Motorrad) bei einer Umgebungstemperatur von 5 °C mit diesem Zyklus getestet. Diese Messungen fanden in Ergänzung zur Untersuchung von Sommerkaltstarts der Fachhochschule Biel statt [5].

2.4.8 Merkmale der Prüfzyklen

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Merkmale der im Standardprogramm gefahrenen Prüfzyklen zusammengefasst.

Zyklus	Bag #	Bezeichnung der Fahrkurve	V_{mittel} [km/h]	V_{min} [km/h]	V_{max} [km/h]	Dauer [s]	Charakteristik
UDC	1	2 ECE	18.7	0	50	390	Aufwärmphase
	2	4 ECE	18.7	0	50	780	legislativer Zyklus
FHB	1	Zentrum	22.1	0	59.3	401	real / innerorts / sehr dynamisch
	2	Peripherie	29.6	0	52.2	466	real / innerorts / dynamisch
CADC	3	Ueberland	50.2	0	78.9	524	real / ausserorts / flüssig
	1 ¹	innerorts (urban)	17.5	0	57.7	920	real / repräsentativ / sehr dynamisch
	2 ²	ausserorts (rural)	60.4	0	111.5	980	real / repräsentativ / flüssig
WMTC ⁵	3 ³	Autobahn (motorway) 130	116.4	42.9	131.8	735	real / repräsentativ / flüssig / schnell
	3 ⁴	Autobahn (motorway) 150	120.4	42.9	150.4	735	real / repräsentativ / flüssig / schnell
	1	innerorts (Phase 1), kalt	24.4	0	60	600	real / dynamisch
	2	ausserorts (Phase2)	54.7	0	94.9	600	real / flüssig
Scooter	3	Autobahn (Phase 3)	94.4	0	125.3	600	real / flüssig / schnell
	1 resp. 3 ⁶	innerorts (Phase 1), warm	24.4	0	60	600	real / dynamisch
	1	FHB Zentrum verkürzt	22.7	0	48.1	300	real / innerorts / sehr dynamisch
Motorbike	2	FHB Zentrum verkürzt	22.7	0	48.1	300	real / innerorts / sehr dynamisch
	3	FHB Zentrum verkürzt	22.7	0	48.1	300	real / innerorts / sehr dynamisch
	1	WMTC ausserorts (Phase2)	54.7	0	94.9	516	real / flüssig
	2	WMTC ausserorts (Phase2)	54.7	0	94.9	516	real / flüssig
	3	WMTC ausserorts (Phase2)	54.7	0	94.9	516	real / flüssig

Tabelle 3: Hauptmerkmale der Prüfzyklen

¹ besteht aus 6 Fahrkurven unterschiedlicher Charakteristik

² besteht aus 5 Fahrkurven unterschiedlicher Charakteristik

³ besteht aus 4 Fahrkurven unterschiedlicher Charakteristik

⁴ Zwei Fahrzeuge wurden irrtümlicherweise im offenen Zyklus für Personenwagen gemessen, dessen Höchstgeschwindigkeit 150 km/h beträgt.

⁵ aus der Realität abgeleitet

⁶ Emissionen der Phase 1 mit Warmstart wurden in Bag 3 gesammelt, sofern keine Messung in Phase 3 stattfand. Sonst wurde der Bag 1 frisch gefüllt.

2.5 Durchgeführte Versuche

Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die im Standardprogramm gefahrenen Prüfzyklen für jedes Fahrzeug.

Zyklus	Bezeichnung des Fahrmusters	SZ7-03	SZF-04	SV7-05	SV7-06
UDC	2 ECE	X	X	X	X
	4 ECE	X	X	X	X
FHB	Zentrum	X	X	X	X
	Peripherie	X	X	X	X
	Ueberland	X	X	X	X
CADC	innerorts (urban)	X	X	X	X
	ausserorts (rural)		X	X	X
	Autobahn (motorway) 130				
	Autobahn (motorway) 150				X
WMTC	innerorts (Phase 1), kalt		X	X	X
	ausserorts (Phase2)		X	X	X
	Autobahn (Phase 3)				X
	innerorts (Phase 1), warm		X	X	X
Scooter	FHB Zentrum abgeschwächt	X	X	X	
	FHB Zentrum abgeschwächt	X	X	X	
	FHB Zentrum abgeschwächt	X	X	X	
Motorbike	WMTC ausserorts (Phase2), 23°				X
	WMTC ausserorts (Phase2), 23°				X
	WMTC ausserorts (Phase2), 23°				X
Motorbike	WMTC ausserorts (Phase2), 5°				X
	WMTC ausserorts (Phase2), 5°				X
	WMTC ausserorts (Phase2), 5°				X

Tabelle 4: Gefahrene Prüfzyklen der Roller

Zyklus	Bezeichnung des Fahrmusters	MVF-07	MVF-08	MV7-09	MV7-10
UDC	2 ECE	X	X	X	X
	4 ECE	X	X	X	X
FHB	Zentrum	X	X	X	X
	Peripherie	X	X	X	X
	Überland	X	X	X	X
CADC	innerorts (urban)	X	X	X	X
	ausserorts (rural)	X	X	X	X
	Autobahn (motorway) 130		X	X	X
	Autobahn (motorway) 150	X			
WMTC	innerorts (Phase 1), kalt				X
	ausserorts (Phase2)				X
	Autobahn (Phase 3)				X
	innerorts (Phase 1), warm				X
Scooter	FHB Zentrum abgeschwächt				
	FHB Zentrum abgeschwächt				
	FHB Zentrum abgeschwächt				
Motorbike	WMTC Ausserorts (Phase2), 23°	X	X	X	X
	WMTC Ausserorts (Phase2), 23°	X	X	X	X
	WMTC Ausserorts (Phase2), 23°	X	X	X	X
Motorbike	WMTC Ausserorts (Phase2), 5°	X			
	WMTC Ausserorts (Phase2), 5°	X			
	WMTC Ausserorts (Phase2), 5°	X			

Tabelle 5: Gefahrene Prüfzyklen der Motorräder

2.6 Messtechnik und Aufbereitung der Messdaten

2.6.1 Messaufbau / Probenahme

Die Bestimmung der Emissionswerte (in g/s oder g/km) bzw. des Brennstoffverbrauches (in g/s oder l/100 km) setzt eine präzise Messung der Konzentrationen einzelner Spezies voraus. In Abbildung 1 sind die Messeinrichtungen schematisch dargestellt.

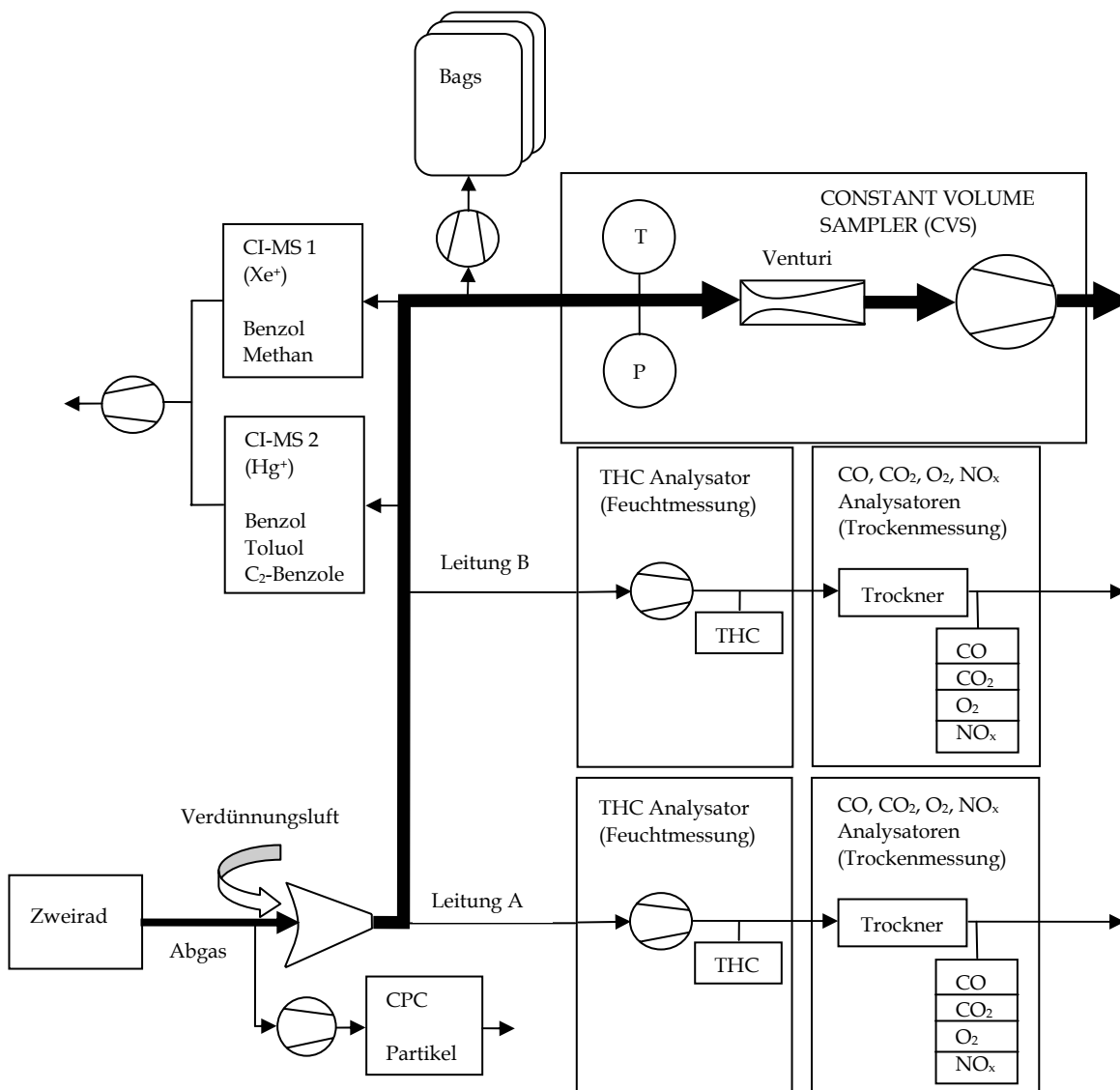


Abbildung 1: Schema der Messeinrichtungen

Die CVS-Anlage (Constant Volume Sampler) stellt mittels einer sonisch durchströmten Venturidüse einen konstanten und bekannten Massenstrom des verdünnten Abgases ein.

Bei Messungen von Personenwagen ist eine sog. geschlossene Verdünnung üblich. Der von der CVS-Anlage erzeugte Unterdruck zieht das Abgas vom Auspuff des Fahrzeugs ab. Ein Teil des Rohgases kann für die zeitaufgelöste Analyse genutzt werden, das restliche Abgas wird mit Verdünnungsluft vermischt und für die Baganalyse verwendet.

Dieses Vorgehen würde bei den vergleichsweise kleinen Motoren der Zweiräder zu tiefe Gegendrücke erzeugen. Beim Ausstossen des Abgases muss der Motor Arbeit verrichten. Liegt am Auspuff ein zu tiefer Druck an, wird der Motor beim Ausstossen unterstützt. Diese „Hilfe“ würde das reale Verhalten des Motors verfälschen. Deshalb werden Zweiräder offen verdünnt: Das Abgas wird hinter dem Auspuff zusammen mit Raumluft abgesaugt. Für die Analyse steht daher ausschliesslich verdünntes Abgas zur Verfügung

2.6.2 Bagmessungen

Der einfachere Fall ist die Messung von Bagwerten. Dort wird ein konstanter Teilstrom des verdünnten Abgases in Bags abgefüllt. Die totalen Emissionen während einer Bagmessung lassen sich aus den gemessenen Konzentrationen und dem bekannten Massenstrom durch die CVS-Anlage bestimmen.

2.6.3 Zeitaufgelöste Messungen

Der komplexere Fall ist die Messung und die korrekte zeitliche Zuordnung von zeitaufgelösten Daten. Die zeitaufgelösten Daten können einerseits für Untersuchungen von Sub-Bags verwendet werden. Andererseits bilden sie die Grundlage für Emissionsmodelle, wie sie von der Gruppe Motorfahrzeuge der Abteilung für Verbrennungsmotoren und Feuerungen an der EMPA erarbeitet werden ([9] und [10]). Eine detailliertere Beschreibung der Datenaufbereitung aus zeitaufgelösten Messungen findet man in Abschnitt 3.3. Durch die offene Verdünnung nach Abbildung 1 steht für die zeitaufgelösten Daten nur verdünntes Abgas zur Verfügung. Die Daten wurden für alle Fahrzeuge kurz nach dem Mischpunkt aufgenommen (Leitung A). Für drei Fahrzeuge wurde eine zusätzliche Leitung kurz vor der Abnahme für die Bagmessungen gelegt (Leitung B).

2.7 Entstehung und Wirkung von Schadstoffen

Um unterschiedliche Emissionsniveaus verschiedener Fahrkurven und Fahrzeuggenerationen interpretieren und verstehen zu können, sind die Entstehungsmechanismen in Ottomotoren an dieser Stelle kurz und sehr vereinfacht zusammengefasst. Die Mechanismen sind sehr komplex und abhängig von zahlreichen Parametern. Auch die Wirkungen der Emissionen werden an dieser Stelle kurz beschrieben. Die Messverfahren der hier diskutierten Emissionen werden im Anhang und in [11] erläutert.

2.7.1 NO_x-Emissionen

Entstehung

Die drei wichtigsten Faktoren für die NO_x-Entstehung sind Temperatur, Zeit und Stöchiometrie. Die NO_x-Rohemissionen steigen mit steigender Temperatur und längerer Verweilzeit im Brennraum sowie leicht magerem Gemisch ($\lambda = 1.0 - 1.2$). Der mit Abstand grösste Beitrag zu den NO_x-Emissionen wird von den wenigen Prozenten des Gemisches geleistet, die in Zündkerzennähe als erste verbrennen. Die für die NO_x-Bildung relevante Temperatur sowie die zur Verfügung stehende Zeit werden massgeblich durch den Zündwinkel, das Verdichtungsverhältnis und die Abgasrückführtrate beeinflusst. Praktisch sämtliche verbrauchssenkende Massnahmen (Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses, verbrauchsoptimaler Zündwinkel, leicht magere Stöchiometrie) bewirken einen Anstieg der NO_x-Rohemissionen.

Wirkung

NO und NO₂ werden summarisch als NO_x bezeichnet. NO₂ bildet in Anwesenheit von Feuchtigkeit Salpetersäure und ist daher ein gefährliches Atemgift. In Verbindung mit Kohlenwasserstoffen wirkt NO_x unter Einfluss von Sonnenlicht smogbildend.

Unterschiede zwischen reglementierten und wahren NO_x-Emissionen

Die Konzentration von NO_x setzt sich zusammen aus derjenigen von NO und NO₂. Da häufig nur die summarische Konzentration, also NO_x, gemessen wird, kann nicht zwischen den Anteilen der beiden beteiligten Stoffen unterschieden werden. Das Reglement bestimmt deshalb, bei der Berechnung der Masse davon auszugehen, dass alles NO_x aus NO₂ besteht, da dieser Stoff der gefährlichere ist. Die NO_x-Emissionen in diesem Bericht entsprechen diesem reglementierten NO₂-äquivalenten Wert.

Bei den Bagmessungen wurde zusätzlich die Konzentration von NO gemessen. Aus der Differenz zu NO_x konnte die Konzentration von NO₂ bestimmt werden. Die Addition der NO- und NO₂-Massen lieferte die wahre Emission von NO_x. Im Anhang sind die Bagwerte von reglementiertem NO_x (NO₂-äquivalent), NO, NO₂ und wahren NO_x in Tabellen aufgeführt.

2.7.2 HC-Emissionen

Entstehung

Die HC-Rohemissionen entstehen bei fettem Gemisch durch unvollständige Verbrennung, in Spaltregionen des Brennraumes, welche die Flamme nicht erfasst, an der kalten Grenzschicht der Brennraumoberfläche sowie durch Absorption und Freigabe von Kohlenwasserstoffen im Schmierölfilm. Im Fall von magerem Betrieb ist die unvollständige Verbrennung (Flammlöschen) Hauptquelle der HC-Emissionen. Ein sehr grosser Anteil der HC-Emissionen wird bereits im Auspuff nachoxidiert; deshalb tragen hohe Auspufftemperaturen wesentlich zur Verminderung von HC-Rohemissionen bei. Die Auspufftemperaturen werden massgeblich vom Zündwinkel beeinflusst, verbrauchsoptimale

(d.h. eher frühe) Zündwinkel senken die Auspufftemperatur und steigern demnach die HC-Emissionen. Ebenso nehmen die HC-Emissionen mit steigender Abgasrückführtrate zu. Es besteht eine gewisse Gegenläufigkeit bei der Bekämpfung von HC- und NO_x-Emissionen: Massnahmen zur Senkung von HC-Rohemissionen steigern die NO_x-Rohemissionen und umgekehrt.

Wirkung

Die Kohlenwasserstoffverbindungen sind ein Gemisch von Substanzen. Sie enthalten sowohl harmlose als auch schleimhautreizende, geruchsbelästigende, smogbildende und vermutlich auch krebserregende Verbindungen. Viele Kohlenwasserstoffe sind Treibhausgase.

Die Kohlenwasserstoffe sind ein Gemisch von bis zu 190 Substanzen, ähnlich wie auch die Treibstoffe Benzin und Diesel aus dieser Vielzahl von Substanzen bestehen. Da die verschiedenen Kohlenwasserstoffe ungleich rasch verbrennen und auch im Katalysator unterschiedlich „gern“ oxidieren, muss davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzung der HC im Abgas grundsätzlich von der Treibstoffzusammensetzung verschieden ist. Trotzdem wird bei der Bestimmung der totalen Kohlenwasserstoffe (HC) davon ausgegangen, dass sich das C/H-Verhältnis gegenüber dem Treibstoff nicht verändert hat: Der Flammenionisationsdetektor wird auf C₁ kalibriert, d.h. er zählt die Anzahl Kohlenwasserstoffatome. Diese Konzentration wird anschliessend mit der Molmasse von durchschnittlichem Treibstoff C₁H_{1.85} hochgerechnet.

Neben dem Gesamtwert der Kohlenwasserstoffe interessieren einerseits die zeitaufgelösten Werte von bestimmten, speziell auffälligen Substanzen: Benzol (C₆H₆), Toluol (C₇H₈), C₂-Benzole (C₈H₁₀) und Methan (CH₄) (siehe Abschnitte 2.7.5 - 2.7.8 und 3.4 - 3.5). Diese Schadstoffe werden mit einer Abtastrate von 1 Hertz (1 Wert pro Sekunde) mit dem Chemischen Ionisations-Massenspektrometer (CI-MS im Hg⁺-Modus) bestimmt, und durch Integration der aufgezeichneten Konzentrations-Verläufe werden mittlere Konzentrationen errechnet (Bagdaten).

Aus dem in Säcken gesammelten Abgas können andererseits die Konzentrationen aller vorkommenden Kohlenwasserstoffe mit Gas- und Flüssigchromatographie einzeln bestimmt werden. Aus dieser Spezierung der Kohlenwasserstoffe kann das Ozonbildungspotential des Abgases bestimmt werden (siehe Abschnitt 3.7). Aufgrund der Treibstoffzusammensetzung können in der Regel nicht alle messbaren 190 Substanzen im Abgas vorgefunden werden.

2.7.3 CO-Emissionen

Entstehung

Kohlenmonoxid-Emissionen entstehen durch unvollständige Verbrennung, hervorgerufen durch Sauerstoffmangel in der Reaktionszone. Dies tritt v.a. beim Anfahren in der

Kaltstartphase, beim Anfetten bei hohen Motorlasten sowie in transienten Zeitabschnitten mit fettem Betrieb auf.

Wirkung

CO ist ein farb- und geruchloses Gas. Es ist ein sehr starkes Gift, da es das Hämoglobin im Blut bindet und so den Sauerstofftransport verhindert. Weiter kann es zu CO₂ oxidieren und hat damit auch einen indirekten Treibhauseffekt.

2.7.4 CO₂-Emissionen

Entstehung

CO₂ entsteht aus der Oxidation kohlenstoffhaltiger Brennstoffe. Die CO₂-Emissionen sind also annähernd proportional zum Brennstoffverbrauch (der Kohlenstoffverlust in den CO- und HC-Emissionen ist in der Regel vernachlässigbar klein).

Wirkung

CO₂-Emissionen werden nicht als Schadstoffemissionen bezeichnet, sie haben keine unmittelbar schädliche Wirkung auf Lebewesen. Allerdings ist CO₂ ein Gas, welches den Energiehaushalt der Erdatmosphäre in Richtung höherer Absorption der Sonnenenergie- und damit in Richtung einer höheren mittleren Temperatur verschiebt. Man bezeichnet deshalb CO₂ als Treibhausgas (zu den Treibhausgasen zählen z.B. auch stratosphärischer Wasserdampf, troposphärisches Ozon, CH₄, N₂O, FCKW).

2.7.5 Methan-Emissionen (CH₄)

Entstehung

Methan ist der flüchtigste Kohlenwasserstoff und siedet ab -161 °C. Es entsteht im Motorraum durch thermische Zersetzung von Treibstoffbestandteilen und anschließender unvollständiger Verbrennung. Vor allem in der Startphase mit kaltem Motor treten hohe Methanemissionen auf, da (i) die Flamme in der kalten Brennkammer den Treibstoff nur teilweise verbrennt, (ii) die Flamme vor der vollständigen Verdampfung des Treibstoffes erlischt und (iii) das Fahrzeug mit fettem Gemisch (Choke) betrieben wird. Weiter kann aus Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO) bei hoher Temperatur Methan (CH₄) und Wasser (H₂O) entstehen. Dieser chemische Prozess benötigt Energie (endotherm) und ist somit erst bei heissem Motor relevant. Die mehrheitliche Umwandlung von Methan im Katalysator findet erst bei hohen Temperaturen statt. Ist kein Katalysator vorhanden, wie dies heute noch bei den meisten Motorrädern der Fall ist, gelangt das gesamte motorisch entstandene Methan in die Umwelt.

Wirkung

Methan, auch als Grubengas bekannt, ist ein farbloses, geruchloses, mit bläulicher Flamme brennendes Gas, das zu ca. 1.7 ppm ($1.7 \cdot 10^{-6}$) natürlich in der Luft vorkommt. Das Gas ist in Wasser wenig löslich, gut löslich in organischen Lösungsmitteln wie Benzin,

zin, Alkohol und Ether. Methan wirkt sehr schwach betäubend, und wenn es in hohen Konzentrationen die Luft verdrängt, besteht Erstickungsgefahr. Der Treibhauseffekt von Methan ist ca. 23 Mal stärker als der von CO₂. Methan ist neben CO₂ eines der bedeutendsten Treibhausgase. Es stammt nicht nur vom Verkehr, sondern wird auch bei verschiedenen landwirtschaftlichen Tätigkeiten in grossen Mengen emittiert.

2.7.6 Benzol-Emissionen (C₆H₆)

Entstehung

Benzol, ebenfalls ein flüchtiger Kohlenwasserstoff, siedet bei 80 °C. Benzol ist eine Verbindung mit hoher Oktanzahl (ROZ = 99) und in Benzin mit verschiedenster Qualität vorhanden. Seit dem Jahr 2000 ist ein maximaler Benzolgehalt von 1 Vol-% des Treibstoffes in der Schweiz zulässig. Benzol kann aber auch im Brennraum durch thermische Zersetzung von höheren Monoaromaten gebildet werden. Auch Fahrzeuge mit 3-Wege-Katalysator können unter Betriebsbedingungen mit hoher Temperatur und substöchiometrischem Treibstoff-Luft-Verhältnis ($\lambda < 1$) Benzol bilden. Bei Motorrädern ohne Katalysator ist der Benzolgehalt im Abgas in etwa proportional zum Gehalt im Treibstoff. Die katalytische Abgasnachbehandlung verändert das Benzol/HC-Verhältnis stark.

Wirkung

Benzol ist als Giftklasse 1* deklariert und hat eine bewiesene krebserregende Wirkung auf den Menschen. Es kann kein Schwellwert für Benzol definiert werden, unterhalb dessen keine Gesundheitsgefährdung besteht. Die aktuelle Belastung der Schweizer Bevölkerung durch Benzol in der Aussenluft führt zu einem Leukämierisiko, das um das Zwanzigfache über dem Schutzziel der Umweltschutzgesetzgebung liegt. Benzol ist eine farblose Flüssigkeit von charakteristischem Geruch, mit Explosionsgrenzen in Luft von 1.4 - 8 Vol.-%. Es ist mit Wasser nur geringfügig, mit organischen Lösungsmitteln in jedem Verhältnis mischbar. Physiologisch wirkt Benzol bei längerem Einatmen als starkes Gift, das zu Schwindel, Erbrechen und Bewusstlosigkeit führt, 20'000 ppm für 5 - 10 Minuten wirken tödlich. Die Flüssigkeit kann auch durch die Haut aufgenommen werden und auf diesem Wege schwere Vergiftungen verursachen. Chronische Vergiftungen führen zu Schädigungen von Knochenmark, Leber und Nieren und können Leukämie auslösen.

2.7.7 Toluol-Emissionen (C₇H₈)

Entstehung

Toluol ist wie Benzol auch ein Benzin-Bestandteil, ist jedoch in deutlich grösserer Menge vorhanden (ca. 10 Vol-%). Die Oktanzahl von Toluol ist mit ROZ = 124 deutlich höher als jene von Benzol. Auch Toluol kann durch thermische Zersetzung (Dealkylierung) aus Alkylbenzolen sowohl im Brennraum als auch im 3-Wege-Katalysator entstehen. Die chemischen Prozesse, die zu Toluol führen, sind daher vergleichbar mit jenen, die zu Benzol führen. Die katalytische Nachverbrennung von Toluol gelingt jedoch mit hö-

herer Ausbeute als jene von Benzol, da auch Toluol zu Benzol umgewandelt werden kann.

Wirkung

Die Toxizität (Giftklasse 4) von Toluol (Methylbenzol) ist deutlich geringer als jene von Benzol. Toluol ist eine angenehm aromatisch riechende, farblose, stark lichtbrechende Flüssigkeit und verbrennt mit stark leuchtender, rußender Flamme. Toluol ist sehr wenig löslich in Wasser, jedoch mischbar mit Alkohol, Ether und weiteren organischen Lösungsmitteln. Es bildet ein zündfähiges Gemisch zwischen 1.2 - 7.1 Vol-%. Die Dämpfe wirken in hohen Konzentrationen narkotisch und reizen Augen sowie Atemwege. Der Kontakt mit der Flüssigkeit verursacht Reizungen der Augen und nach anhaltender Einwirkung auch der Haut, über die sie ebenfalls aufgenommen werden kann.

2.7.8 C₂-Benzol-Emissionen (C₈H₁₀)

Entstehung

Die Klasse der C₂-Benzole besteht aus den vier Komponenten ortho-, meta- und para-Xylol sowie Ethylbenzol und ist ein wesentlicher Benzinbestandteil (oft über 20 Vol-%). Die Oktanzahlen der vier Komponenten liegen zwischen 124 (Ethylbenzol) und 146 (p-Xylol) und erhöhen die gemessene Oktanzahl im Benzin. Somit ist nicht ihre eventuelle Entstehung ein Thema, sondern ihre vollständige Umsetzung im Motorraum bzw. im Katalysator, sofern vorhanden. C₂-Benzole werden nicht in relevanten Mengen gebildet, weder im Brennraum noch im Katalysator. Ihre Emissionen sind somit ausschliesslich auf unverbrannte Benzinrückstände zurückzuführen.

Wirkung

Die vier C₂-Benzole sind alles farblose, stark lichtbrechende, aromatisch riechende, brennfähige Flüssigkeiten, welche mit stark rußender Flamme verbrennen und mit Luft im Bereich von 1 - 7 Vol-% explosionsfähige Gemische bilden. Die C₂-Benzole sind in Wasser unlöslich, leicht löslich in Alkohol, Ether, Benzol, Benzin und anderen organischen Lösungsmitteln. Die vier Substanzen verhalten sich annähernd wie Toluol und haben ebenfalls alle die Giftklasse 4. C₂-Benzole haben wie andere ungesättigte Kohlenwasserstoffe sehr hohe Ozonbildungspotenziale und tragen massgeblich zur troposphärischen Ozonbildung bei.

2.7.9 Katalytische Abgasnachbehandlung

Im chemischen Gleichgewicht bei Umgebungsbedingungen (Temperatur um 20 °C, sauerstoffreiche Umgebung) sind eigentlich alle gasförmigen Schadstoffe instabil. Allerdings ist die Abkühlung der Gase beim Durchlauf des motorischen Prozesses so schnell, und die Reaktionsgeschwindigkeiten des Schadstoffabbaues sind bei den anschliessend vorhandenen Bedingungen so langsam, dass die im Brennraum gebildeten Schadstoffkonzentrationen „eingefroren“ bleiben. Mit Hilfe von

katalytischen Reaktionen im Abgassystem lassen sich die Konzentrationen bei tieferen Temperaturen in Richtung ihres chemischen Gleichgewichts verschieben.

In Personenwagen werden moderne Ottomotoren im normalen Zustand stöchiometrisch betrieben, d.h. es existiert weder Sauerstoffüberschuss noch Sauerstoffmangel für eine vollständige Reaktion. Die in der Abgasanlage vorhandenen 3-Wege-Katalysatoren haben netto eine Wirkung auf alle drei Hauptschadstoffkomponenten: CO und HC werden mit Hilfe des im NO_x gebundenen Sauerstoffes oxidiert. Obwohl Katalysatoren über eine gewisse Sauerstoffspeicherfähigkeit verfügen, ist für die effiziente Konvertierung ein im zeitlichen Mittel exakt stöchiometrischer Motorbetrieb nötig. Die sogenannte Lambdaregelung versucht, eben diesen stöchiometrischen Motorbetrieb sicherzustellen. Dies ist besonders bei transienten Motorbetriebspunkten (z.B. abruptes Gaswegnehmen beim Gangwechsel) nicht perfekt möglich. Aufgrund bestimmter dynamischer Eigenschaften des Gemischbildungssystems (sog. Wandfilmdynamik) kann die Stöchiometrie des in den Brennraum gelangenden Gemisches in solch hoch transienten Situationen nicht exakt eingehalten werden. Hohe nach-Kat-Emissionen treten häufig in solchen transienten Zuständen auf.

Katalysatoren benötigen ein bestimmtes minimales Temperaturniveau, um gut zu konvertieren (sog. Anspringtemperatur, 300 – 350 °C). Ein sehr hoher Anteil der Gesamtemissionen einer Fahrt entsteht folglich in den ersten Minuten nach dem Kaltstart. Das möglichst schnelle Erreichen der Anspringtemperatur des Katalysators ist deshalb enorm wichtig. Dies kann z.B. durch motornäheren Einbau des Katalysators, durch Einsatz eines zusätzlichen und im warmen Motorbetrieb umgehbaren Katalysators oder durch elektrische Beheizung des Katalysators erreicht werden. Da die üblichen legislativen Prüfungen mit kaltem Motor durchzuführen sind, werden schärfere Abgasgrenzwerte häufig allein durch ein schnelleres Erreichen der Katalysatoranspringtemperatur eingehalten.

Die Schadstoffgesetzgebung der Zweiräder enthält derart hohe Grenzwerte, dass diese Technologie nicht angewandt werden muss. Deshalb verfügen die meisten Zweiräder über einen Vergaser. Die Gemischbildung erfolgt dabei auf mechanischem Weg und ist nicht geregelt. Da sich im Saugrohr ein Wandfilm dynamisch auf- und abbaut, muss sichergestellt werden, dass in jedem Fall für die Verbrennung genügend Brennstoff den Zylinder erreicht. Der Motor wird daher zur Verbesserung der Laufruhe meist in fettem, nicht stöchiometrischem Betrieb gefahren.

Zur Verminderung der HC- und CO-Emissionen werden in Zweirädern häufig unregelte Oxidationskatalysatoren eingesetzt. Bei 2-Takt-Motoren gelangt der notwendige Sauerstoff durch die Querspülung in den Auspuff. Bei Viertaktern werden in der Auspuffanlage sog. Sekundärluftventile angebracht, wodurch dem Abgas Luft beigemischt wird. Diese Ventile werden so bedient, dass genügend Sauerstoff zum Abbau von CO und HC vorhanden ist, das Abgas (und der Oxidationskatalysator) jedoch nicht zu stark abgekühlt wird.

3 Auswertung

3.1 Vergleich der Bagwerte mit den integrierten Werten

3.1.1 Limitierte Schadstoffe (CO, HC, NO_x, CO₂)

Die Emissionen wurden sowohl durch Bagmessungen als auch durch numerische Integration des transient aufgezeichneten verdünnten Abgases bestimmt. Abbildung 2 stellt die Werte gegeneinander dar. Die Punkte bezeichnen die Beziehung zwischen Bag- und integriertem Wert der Leitung A. Wo Messwerte von Leitung B vorhanden sind, wurden diese mit einem Punkt und die entsprechenden Werte von Leitung A mit einem Kreuz versehen.

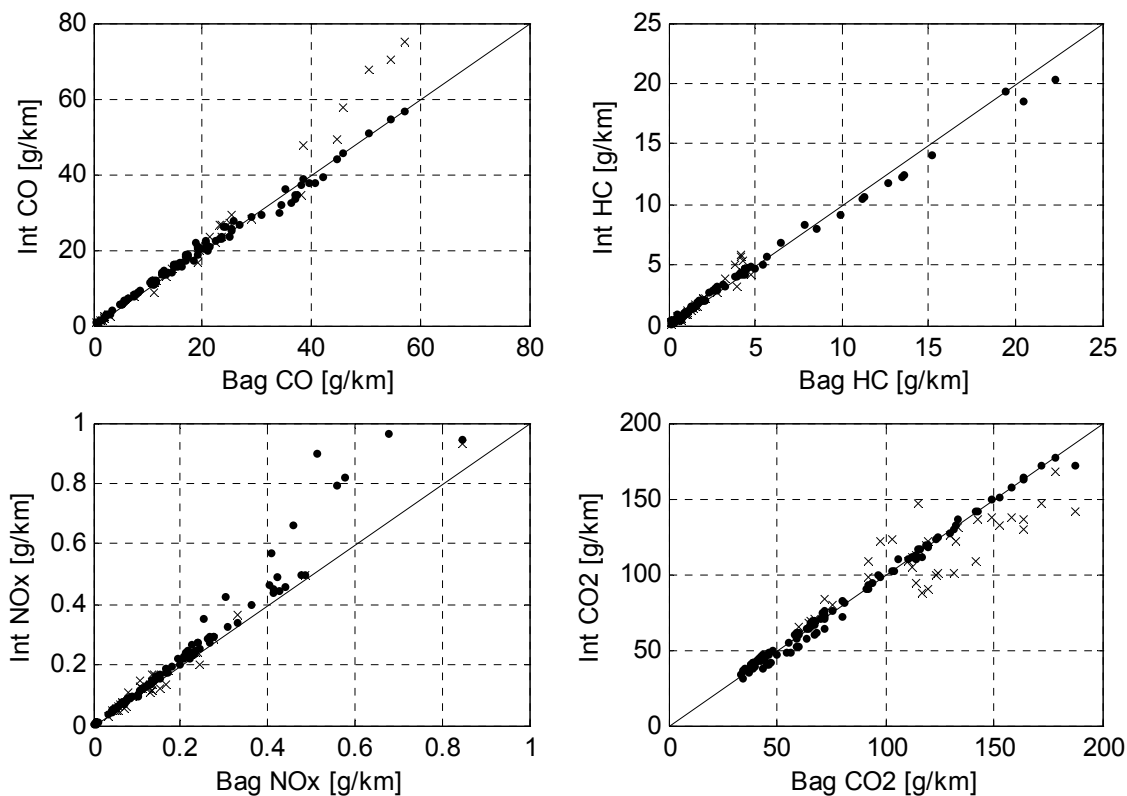


Abbildung 2: Integrierte Emissionsdaten versus Bagdaten

Im Allgemeinen stimmen die Bagwerte gut mit den integrierten Werten überein. An den Graphiken von CO und CO₂ sieht man, wie die Integralwerte der Leitung A von den Bagwerten abweichen (Kreuze). Vermutlich war die Distanz vom Mischpunkt zur Abnahme dieser Leitung für eine gute Vermischung des Abgases mit der Verdünnungsluft zu kurz. Daher werden für die weitere Analyse die Werte von Leitung B genommen, wo diese vorhanden sind (Fahrzeuge 8, 9 und 10).

3.1.2 Nichtlimitierte Schadstoffe

Die mittleren Abgaskonzentrationen (in ppm) von Benzol (C_6H_6), Toluol (C_7H_8) und der C_2 -Benzole (C_8H_{10}), welche mit zwei unabhängigen Messprinzipien und zwei unterschiedlichen Probenahmeverfahren erhalten wurden (GC-FID aus dem Bag und CI-MS online mit 1 Hz), stimmen gut überein. Für die Methanmessung wurde zusätzlich ein zweites CI-MS im Xenon-Modus (Xe^+) betrieben, welches gleichzeitig eine weitere Benzolmessung erlaubt. Auch die beiden CI-MS-Methoden ergaben eine gute Korrelation der Benzoldaten.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der Bag-Werte aus den CADC-Zyklen (13 Wertepaare). Drei Diagramme zeigen die Korrelation der beiden Messverfahren CI-MS (Hg^+) versus GC-FID für die Schadstoffe Benzol, Toluol und die Klasse der C_2 -Benzole. Im vierten Diagramm ist der Vergleich der Benzoldaten aus den beiden CI-MS Messungen (Hg^+ vs. Xe^+) dargestellt.

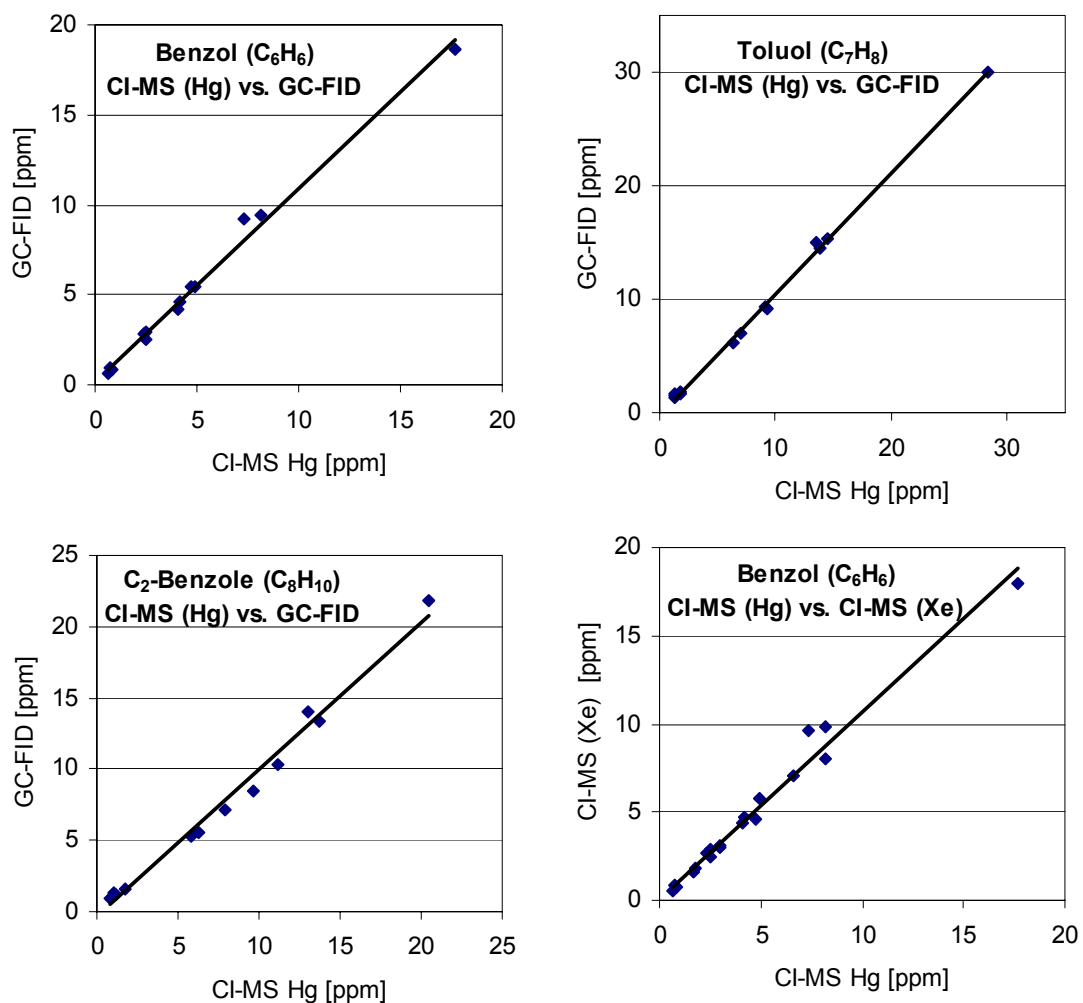


Abbildung 3: CI-MS Integral versus GC-FID-Bagdaten bzw. CI-MS (Hg) versus CI-MS (Xe) Integraldaten

3.2 Limitierte Schadstoffe (CO, HC, NO_x, CO₂)

In diesem Abschnitt werden die Bag-Emissionen des Messprogramms analysiert und verglichen. Die Emissionen werden graphisch dargestellt, die entsprechenden genauen Werte können Tabelle 11 bis Tabelle 17 im Anhang entnommen werden.

Zwei der vermessenen Fahrzeuge arbeiteten in 2, die übrigen in 4 Takten, wovon zwei einen geregelten 3-Wege-Katalysator besaßen. Die Graphiken wurden nach diesen Kriterien mit verschiedener Tönung des Hintergrunds unterteilt. Der Verlauf der Zyklen kann dem Anhang (4.3 - 4.8) entnommen werden.

3.2.1 Legislativer Zyklus

Beim UDC handelt es sich um den legislativen Zyklus für Zweiräder. Der Motor wird kalt gestartet, und nach 40 Sekunden wird der ECE-R 40-Zyklus für das Aufwärmen des Motors zwei Mal hintereinander gefahren. Bei der Typenprüfung wird das Abgas erst während den vier anschliessenden ECE-R 40-Zyklen gemessen. Für die vorliegende Arbeit wurde das Abgas auch für den ersten Abschnitt analysiert, jedoch ohne die ersten 40 Sekunden nach dem Kaltstart. Die Ergebnisse der Bag-Messungen sind in Abbildung 4 dargestellt. Die lang gestrichelten Linien zeigen die entsprechenden Grenzwerte.

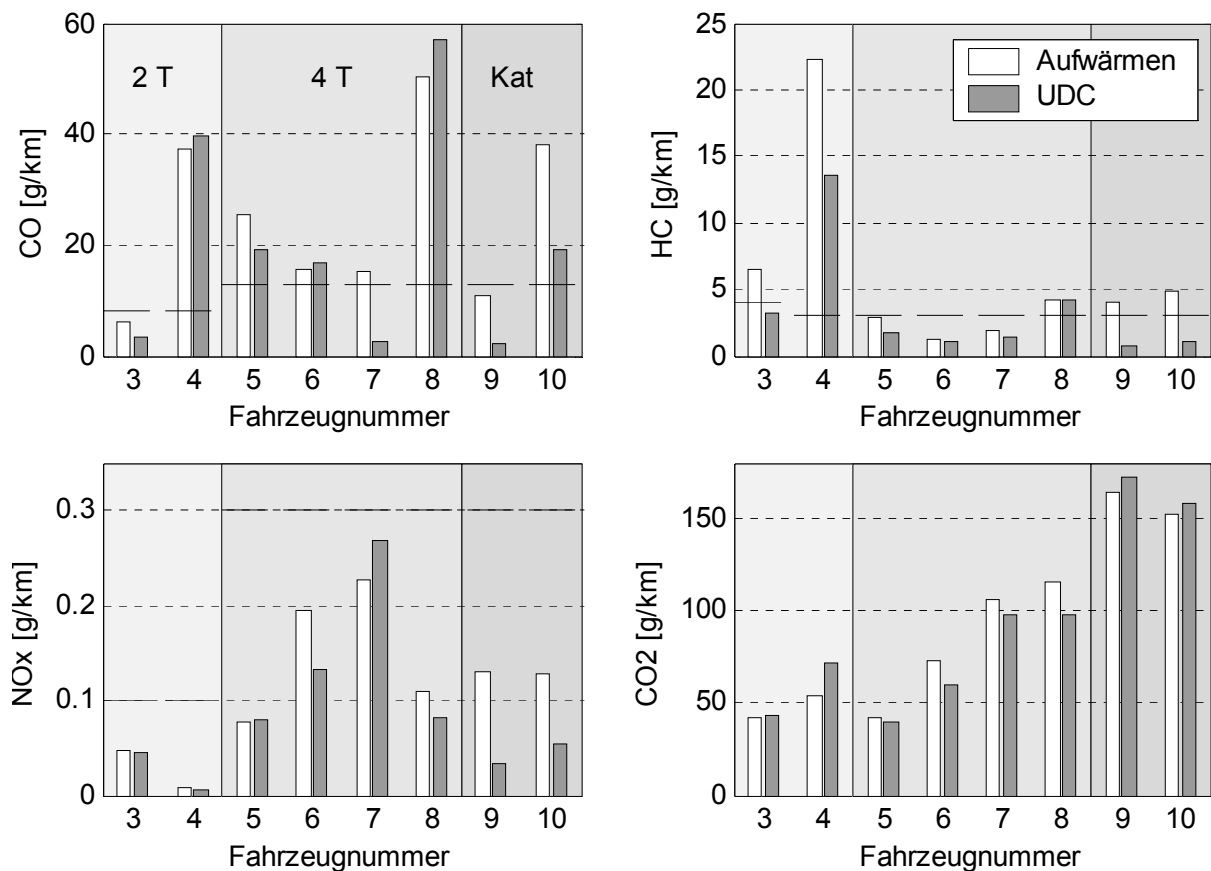


Abbildung 4: Emissionen des UDC mit Grenzwerten

Fünf von acht Fahrzeugen haben eine CO-Emission und zwei eine HC-Emission, die über dem Grenzwert liegt. Mehr als die Hälfte der Zweiräder besteht den legislativen Test demnach nicht.

Die meisten Zweiräder werden ungeregelt betrieben. Das Gemisch ist vorwiegend fett, was geringe Emissionen von NO_x und hohe Ausstösse von CO und HC zur Folge hat. Bezeichnenderweise liegen die NO_x-Emissionen aller Fahrzeuge sowohl während der Aufwärm- als auch der Prüfphase unter dem Grenzwert. HC entsteht vorwiegend durch unvollständige Verbrennung eines fetten und daher sauerstoffarmen Gemischs. Der Vergleich der Aufwärm- und der Prüfphase zeigt, wie die HC-Emissionen mit wärmerem Motor bei allen Fahrzeugen abnehmen. Ein Grund hierfür ist der Choke, der bei kaltem Motor für ein fettes Gemisch sorgt.

Die beiden Zweitakter besitzen einen Oxidationskatalysator, mit dessen Hilfe Fahrzeug 3 zumindest die Prüfphase besteht, während Fahrzeug 4 ausser NO_x keinen Grenzwert einhält. Diese Emission ist zudem ausserordentlich tief, so dass auf eine besonders fette Betriebsweise des Fahrzeugs geschlossen werden kann, die den Oxidationskatalysator vermutlich bereits zerstört hat. Das Gemisch von Fahrzeug 7 hingegen scheint relativ mager zu sein, besonders von der ersten Phase zur zweiten scheint eine Abmagerung des Gemischs stattzufinden, wodurch alle Grenzwerte in der Prüfphase eingehalten werden. Fahrzeug 8 besitzt ein Sekundärluftventil, das an den hohen CO- und tiefen

HC-Emissionen zu erkennen ist. Die deutliche Abnahme der Emissionen der Fahrzeuge 9 und 10 von der Aufwärm- zur Prüfphase lassen den 3-Wege-Katalysator erkennen, der auf eine bestimmte Anspringtemperatur erwärmt werden muss, damit seine Wirkung einsetzt. Ebenso typisch ist die Zunahme des CO₂ und somit des Verbrauchs mit zunehmender Leistung und Gewicht des Fahrzeugs.

3.2.2 Reale Zyklen mit warmem Motor

Die realen Zyklen FHB, CADC und WMTC wurden mit zu Beginn betriebswarmem Motor gefahren. Die Zyklen SC (Scooter cold start) und MC (Motorbike cold start) wurden mit kaltem Motor gestartet. Daraus wurden Kaltstartzuschläge berechnet. Der Innerortsabschnitt des Zyklus WMTC wurde je einmal mit kaltem und warmem Motor gestartet. Auch aus diesen Messungen wurde ein Kaltstartzuschlag berechnet.

Die „warmen“ und „kalten“ Zyklen werden in verschiedenen Abschnitten besprochen. Zusätzlich werden an zwei Fahrzeugen Sommer- und Winterkaltstarts verglichen.

In Abbildung 5 bis Abbildung 8 werden die Emissionen der realen Zyklen gezeigt, die mit warmem Motor gestartet wurden. Die Werte der Bags wurden nach Schadstoff gruppiert. Die Zyklen enthalten folgende Phasen, die der Reihe nach in verschiedenen Grautönen dargestellt sind:

- FHB Zentrum, Peripherie, Überland
- CADC innerorts (urban), ausserorts (rural), Autobahn (motorway)
- WMTC innerorts (Phase 1), ausserorts (Phase 2), Autobahn (Phase 3)

Der Verlauf der Zyklen kann dem Anhang (4.3 - 4.8), Dauer und Durchschnittsgeschwindigkeit der Tabelle 3 entnommen werden.

Die Abschnitte Zentrum und Peripherie des FHB beschreiben eine Innerortsfahrt. Sie werden im Diagramm zwar separat dargestellt, für den Vergleich mit den Innerortsfahrten des CADC und des WMTC können sie jedoch als eine Einheit betrachtet werden. Der Abschnitt Überland des FHB entspricht einer Ausserortsfahrt und kann mit dem entsprechenden Teilzyklus des CADC und des WMTC verglichen werden.

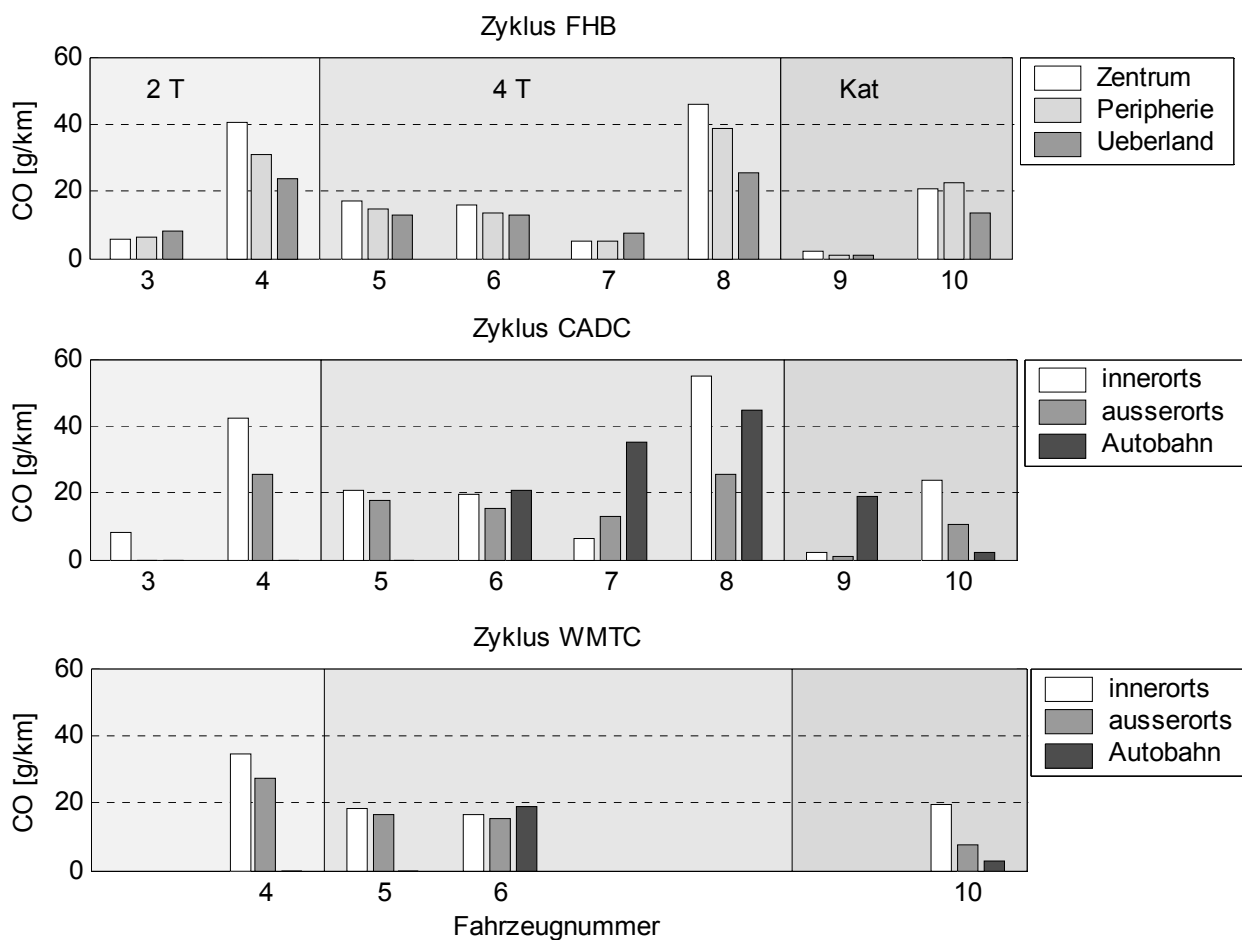


Abbildung 5: CO-Emissionen der warmen realen Zyklen

Die Emissionen vergleichbarer Phasen stimmen allgemein gut überein. Die Innerortsphasen haben tendenziell höhere Emissionen als die Ausserortsabschnitte. Ein Grund hierfür liegt in der hohen Dynamik einer Fahrt in einer Stadt, die durch diese Zyklen repräsentiert wird. Weiter befinden sich die Fahrzeuge innerorts häufiger als in anderen Fahrsituationen im Stillstand, wobei Abgase emittiert werden, ohne eine Strecke zurückzulegen. Bei der Bildung von Emissionen pro Weg werden diese auf die gefahrene Strecke aufgeschlagen. Aus dem gleichen Grund sind die Emissionen des CADC etwas höher als in vergleichbaren Phasen der anderen Zyklen, obwohl deren Dynamik vergleichbar ist, denn der CADC enthält verhältnismässig viele Leerlaufphasen. Die Autobahnabschnitte haben tendenziell höhere Emissionen als die Ausserortsphasen, was sich mit grösserer Leistung am Rad und dadurch höherem Kraftstoffverbrauch begründen lässt.

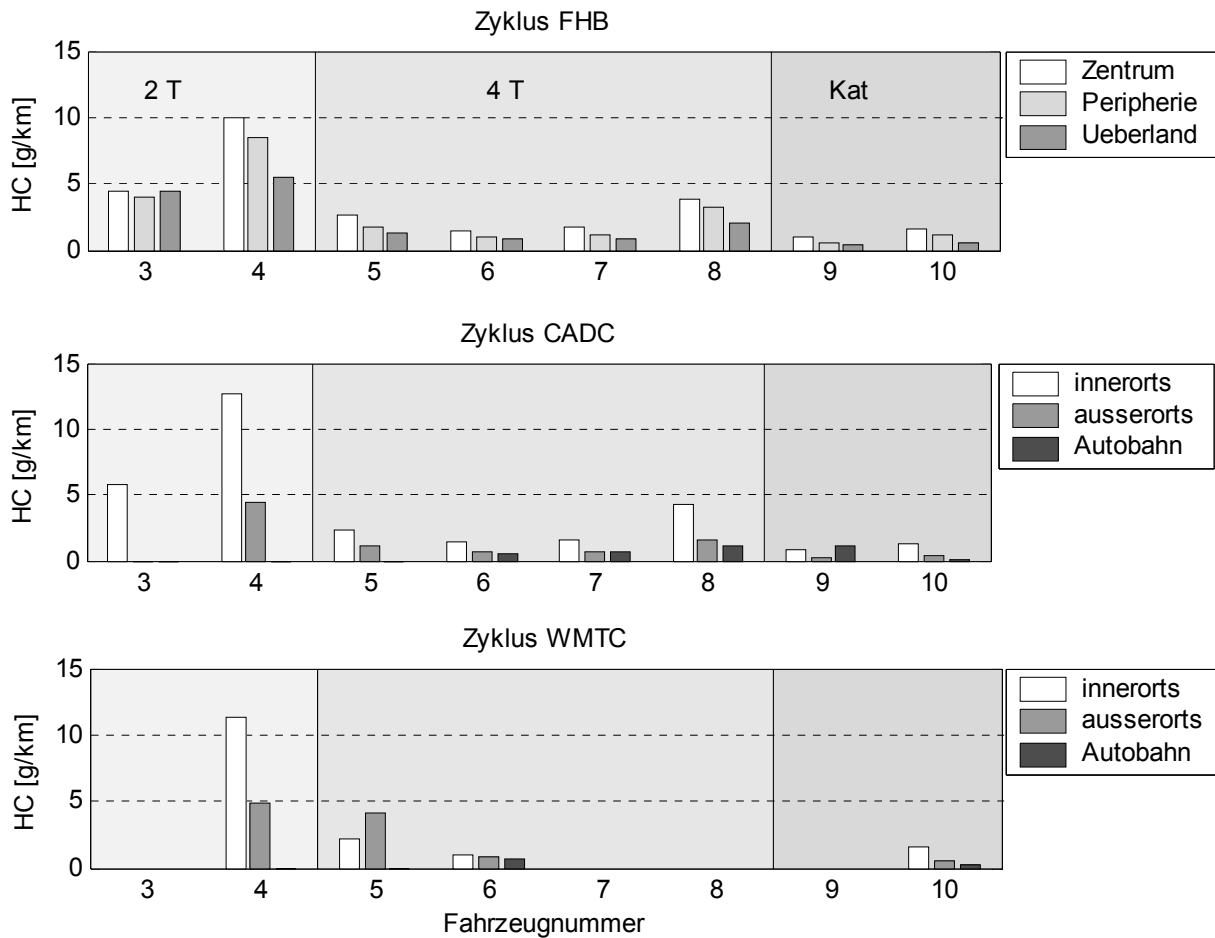


Abbildung 6: HC-Emissionen der warmen realen Zyklen

Die Emissionen der beiden Katalysator-Fahrzeuge, 9 und 10, sind teilweise recht unterschiedlich. Während Fahrzeug 9 ausser im Autobahnabschnitt des CADC erwartungsgemäss wenig CO und HC emittiert, fällt Fahrzeug 10 im Vergleich zu den restlichen Viertaktern in den Inner- und Ausserortsabschnitten nicht besonders auf. In den Autobahnzyklen jedoch emittiert es deutlich weniger HC und CO, jedoch mehr NO_x als andere Fahrzeuge. Einerseits kann dies an der tiefen Temperatur des Abgases inner- und ausserorts liegen, so dass der Katalysator für eine gute Konvertierung nicht warm genug ist, auf dem Autobahnabschnitt aber die benötigte Temperatur erreicht. Andererseits liegt das eventuell an einer Abmagerung des Gemischs auf Strecken mit hohen Lasten wie dem Autobahnzyklus. Die Analyse der zeitaufgelösten Messung der Abgastemperatur und des Lambda-Signals bestätigten beide Vermutungen.

Unter den Emissionen der Viertakter fällt Fahrzeug 8 beim CO auf, jedoch nicht bei den HC. Dank dem Sekundärluftventil oxidieren die unverbrannten Kohlenwasserstoffe teilweise im Auspuff nach und senken damit die HC-Emission.

Von den Zweitaktern ist Fahrzeug 4 mit allgemein hohen CO- und HC- und sehr geringen NO_x besonders auffällig. Die zeitaufgelösten Messungen bestätigten eine sehr fette Betriebsart.

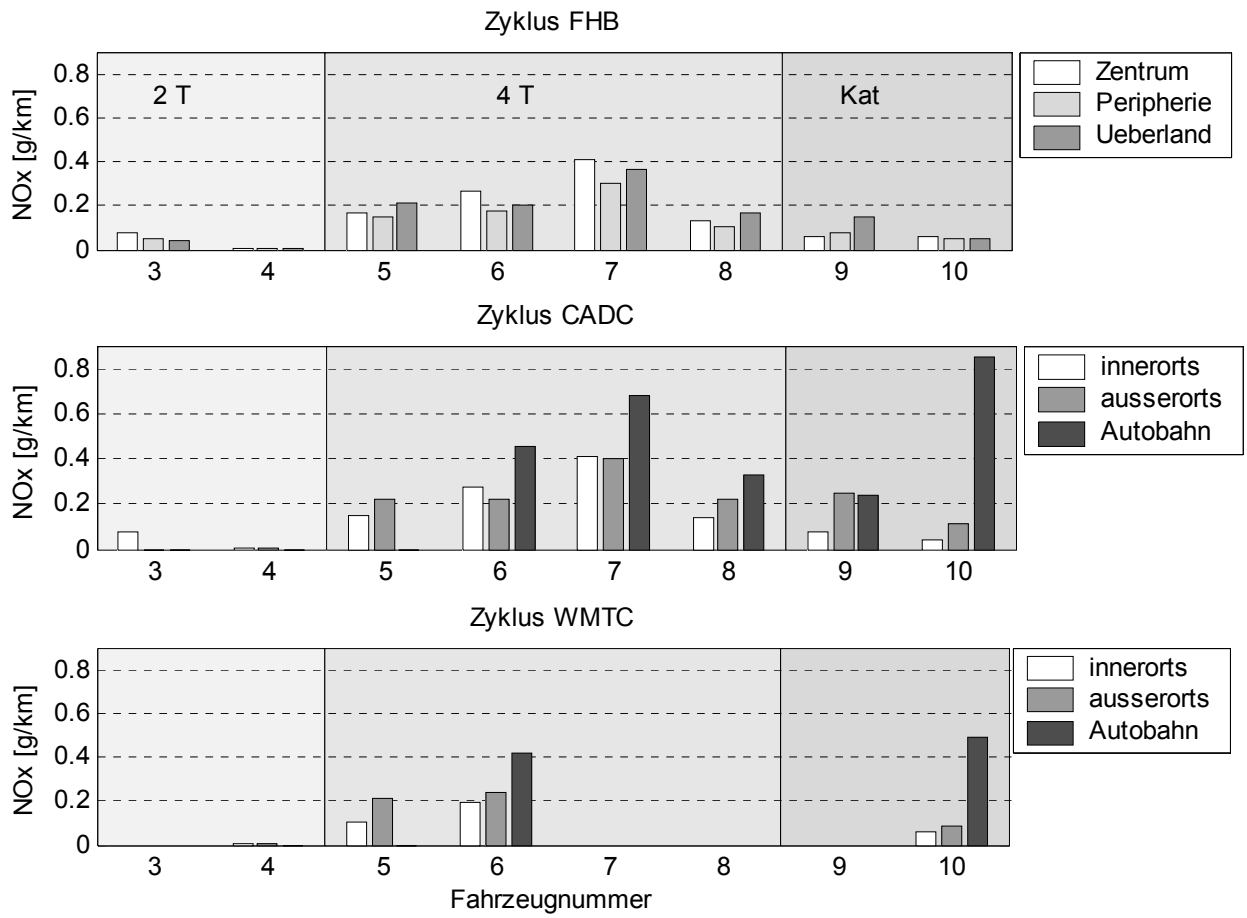


Abbildung 7: NO_x-Emissionen der warmen realen Zyklen

Wie erwartet, steigen die Emissionen von CO₂ mit zunehmender Hubraumgrösse und grösserer Last.

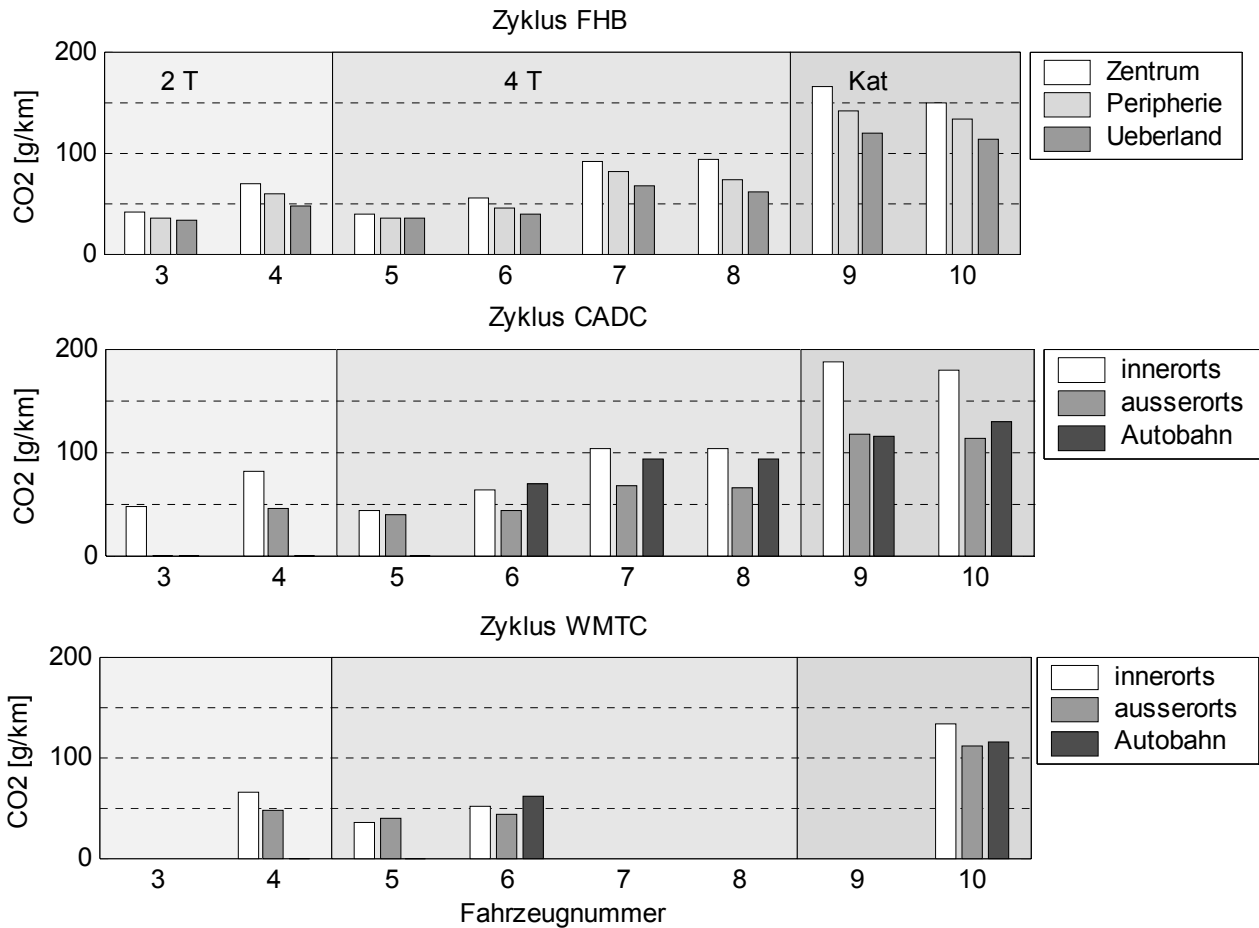


Abbildung 8: CO₂-Emissionen der warmen realen Zyklen

3.2.3 Vergleich Zweiräder mit Personenwagen

Zur Beurteilung ihrer Emissionen werden in diesem Kapitel die gemessenen Zweiräder mit Personenwagen verglichen. An der EMPA wurden im Jahr 2001 sechs benzinbetriebene PW der Legislaturstufe Euro-0 und 17 der Stufe Euro-3 in verschiedenen Tests vermessen. Emissionen aus Messungen im Zyklus CADC, dem einzigen gemeinsamen Zyklus von PW und Zweirädern, werden zueinander ins Verhältnis gesetzt. Dafür werden die Zweiräder in die Kategorien Zwei- und Viertakter (Beschriftung: ‚2T‘ resp. ‚4T‘) und Fahrzeuge mit geregelter Katalysator (Beschriftung: ‚Kat‘) eingeteilt. Für den Vergleich wird der Mittelwert der Emissionsfaktoren der jeweiligen Kategorie durch die mittlere Emission der PW dividiert. Die Ergebnisse sind mit zwei bis vier Fahrzeugen pro Kategorie nicht repräsentativ. Sie beziehen sich lediglich auf die hier getroffene zufällige Stichprobe. Trotzdem geben sie einen Hinweis auf die Grössenordnung der Unterschiede.

Zu beachten ist beim Vergleich, dass die Zweiräder im Teilzyklus Autobahn mit der Variante mit maximaler Geschwindigkeit 130 km/h gemessen wurden. Versehentlich wurden die Fahrzeuge 6 und 7 mit der 150 km/h-Variante gefahren. Bei den PW wurde immer die 150 km/h-Variante benutzt. Wegen zu geringer Leistung konnte Fahrzeug Nummer 3 der Zweiräder nur im Teilzyklus innerorts, die Fahrzeuge 4 und 5 nur inner- und ausserorts gefahren werden. Bei der Unterteilung in die drei genannten Kategorien werden in den Teilzyklen die Mittelwerte der folgenden Fahrzeuge gebildet:

Kategorie	CADC innerorts	CADC ausserorts	CADC Autobahn
2 T	Fzge. 3+4	- ⁸	- ⁹
4 T	Fzge. 5-8	Fzge. 5-8	Fzge. 6-8
Kat	Fzge. 9+10	Fzge. 9+10	Fzge. 9+10

Tabelle 6: Einteilung der Zweiräder in Kategorien

3.2.3.1 Vergleich mit Personenwagen der Stufe Euro-0

Bezinbetriebene Personenwagen der Stufe Euro-0 sind Fahrzeuge aus der Zeit vor 1988, die ohne geregelten 3-Wege-Katalysator betrieben wurden. Sie sind den Motorrädern technisch ähnlich. Für den Vergleich mit den Zweirädern wurden die Mittelwerte der Emissionen von 6 solcher Fahrzeuge verwendet. Das Verhältnis der mittleren Emission Zweirad zur mittleren Emission PW ist in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt.

Selbst ohne Katalysator und Lambda-Regelung emittieren die PW in allen Teilzyklen weniger CO und HC als die unregulierten Zweiräder. Für CO beträgt das Verhältnis innerorts etwa zwei, während es in den restlichen Teilzyklen auf beinahe drei ansteigt. Bei den HC fallen die Zweitakter im Teilzyklus innerorts auf, wo das Verhältnis zu den PW mehr als fünf beträgt. Die unregulierten Viertakter emittieren inner- und ausserorts etwas mehr als die PW, auf der Autobahn beträgt das Verhältnis rund eins. Die beiden Motorräder mit geregeltem 3-Wege-Katalysator hingegen haben meist tiefere CO- und HC-Emissionen als PW der Stufe Euro-0.

⁸ Dieser Zyklus wurde nur von einem Zweitakter gefahren. Ein Vergleich von Zweitaktern mit PW basierend auf einem Fahrzeug erscheint wenig sinnvoll und wird deshalb weggelassen.

⁹ In diesem Teilzyklus sind keine Emissionsdaten von Zweitaktern vorhanden.

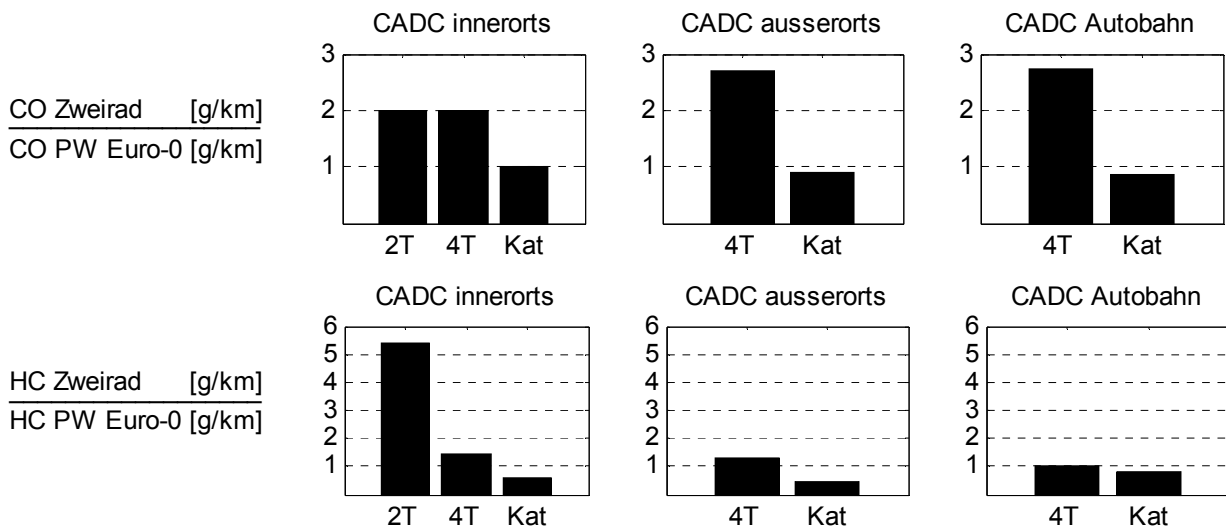


Abbildung 9: Vergleich mit PW Euro-0, CO- und HC-Emissionen

Die Stickoxid-Emissionen der Zweiräder sind durchwegs geringer als diejenigen der PW. Dies ist eine Folge des tendenziell fetten Gemischs von Zweirädern.

Auch der CO₂-Ausstoss und somit der Verbrauch der Zweiräder ist im Vergleich zu den PW geringer, da die Zweiräder eine geringere Masse haben.

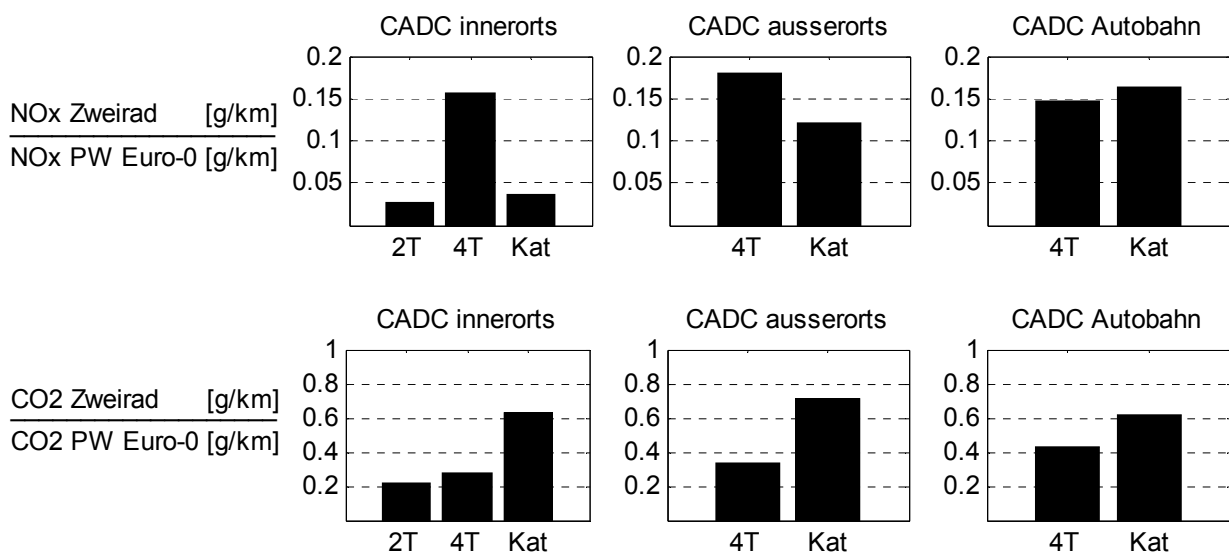


Abbildung 10: Vergleich mit PW Euro-0, NO_x und CO₂

3.2.3.2 Vergleich mit Personenwagen der Stufe Euro-3

Bezinbetriebene Personenwagen der Stufe Euro-3 sind Fahrzeuge, die seit 2000/01 in Verkehr gesetzt wurden. Alle Fahrzeuge besitzen geregelte 3-Wege-Katalysatoren mit Lambda-Sonde. Für den Vergleich mit den Zweirädern wurden die Mittelwerte der

Emissionen von 17 solchen Fahrzeugen verwendet. Die Verhältnisse der mittleren Emissionen sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt.

Die Zweiräder emittieren in jedem Teilzyklus mehr CO und HC als die PW. Auffällig ist die Abnahme des Verhältnisses Emission Zweirad zu Emission PW von einem Teilzyklus zum nächsten.

Innerorts emittieren die unregulierten Zweiräder mehr als 40 Mal mehr CO als die PW, während dieses Verhältnis für die regulierten Zweiräder etwas mehr als 20 beträgt. Auch die HC-Emissionen fallen innerorts auf: Die Zweitakter emittieren 400, die unregulierten Viertakter 100 Mal mehr als die PW. Selbst die regulierten Motorräder haben rund 50 Mal höhere HC-Emissionen als der Durchschnitt der Euro-3 PW. Allerdings fällt dieses Verhältnis auf der Autobahn auf 1.5 bei den regulierten und 2 bei den unregulierten Zweirädern.

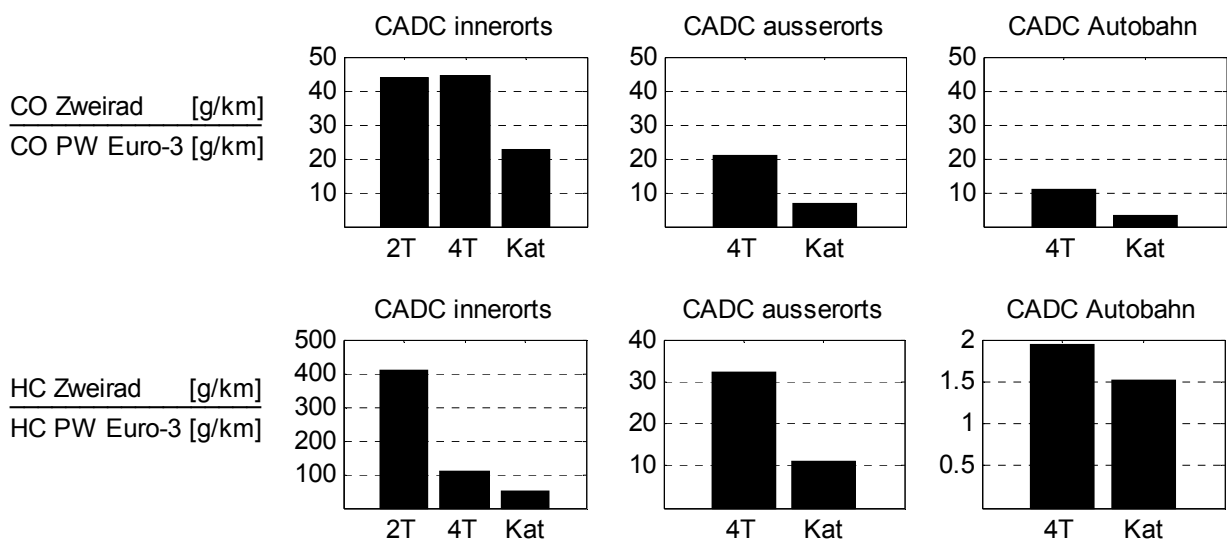


Abbildung 11: Vergleich mit PW Euro-3, CO- und HC

Das Verhältnis der NO_x -Emissionen nimmt von einem zum nächsten Teilzyklus zu: Emittieren die Zweitakter und die regulierten Motorräder innerorts sogar weniger als die PW, steigt das Verhältnis für die Katalysator-Fahrzeuge auf der Autobahn auf etwa 8. Obwohl die Stichprobe mit zwei Fahrzeugen nicht repräsentativ für die ganze Flotte ist, fällt es auf, dass der regulierte 3-Wege-Katalysator der Motorräder die Stickstoffemissionen im Vergleich zu den PW nur unvollständig reduziert.

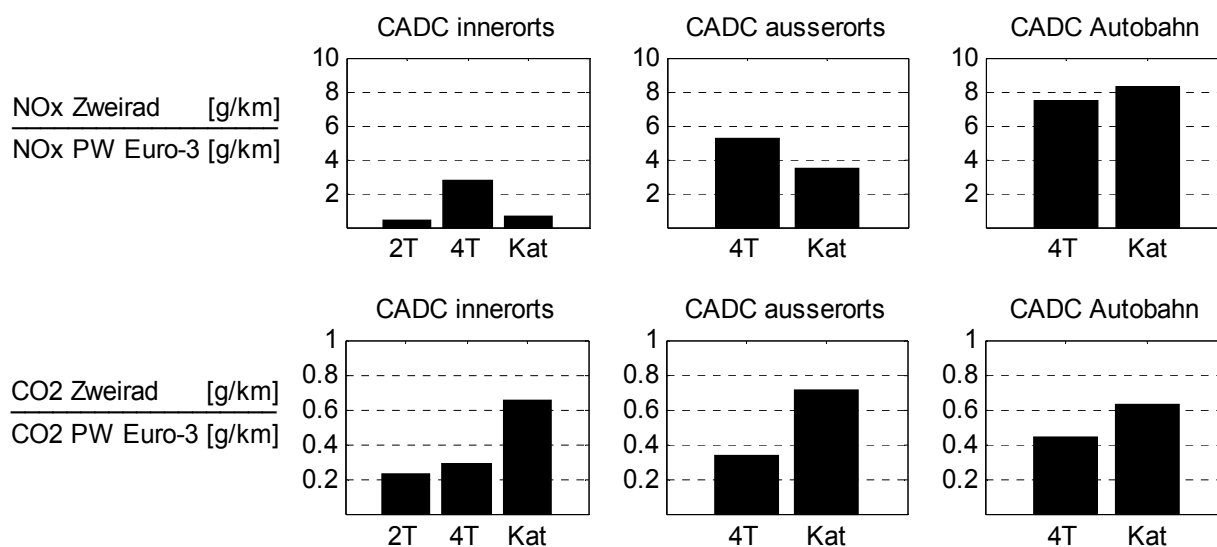


Abbildung 12: Vergleich mit PW Euro-3, NO_x und CO₂

3.2.3.3 Zusammenfassung der Vergleiche der Zweiräder mit Personenwagen

Die Emissionen von CO, HC und NO_x der Zweiräder nahmen im Vergleich mit den PW beim Übergang von Fahrzeugen ohne Katalysator (Euro-0) bis zu den heute in Verkehr gesetzten PW (Euro-3) deutlich zu. Bei den CO-Emissionen nahm das Verhältnis von Zweirad zu PW innerorts von 2 auf 40, also um den Faktor 20 zu. Die HC-Emissionsverhältnisse der unregulierten Zweiräder verschlechterten sich gegenüber den PW von etwa 5 und 1 auf 400 resp. 100, was einem Faktor von 80 bis 100 entspricht. Selbst bei den NO_x wurden die Zweiräder von den PW überholt: Während die Zweiräder noch weniger NO_x emittierten als die PW der Stufe Euro-0, sind die Emissionsverhältnisse gegenüber den Euro-3 PW deutlich höher. Nur der Ausstoss von CO₂ und damit der Verbrauch blieb im Verhältnis konstant.

3.2.4 Kaltstart-Zyklen

Um das Kaltstartverhalten zu untersuchen, wurden die Zweiräder mit kaltem Motor in repetitiven Zyklen getestet. Als Kaltstartzuschlag wird die Mehremission bezeichnet, die ein Fahrzeug aufgrund des kalten gegenüber dem betriebswarmen Motor ausstösst. Weil Katalysatoren erst zu konvertieren beginnen, wenn sie ihre Anspringtemperatur erreichen, werden vor allem bei Katalysatorfahrzeugen positive Zuschläge erwartet. Für die Bestimmung des Kaltstartzuschlags eignen sich repetitive Zyklen, wo ein Fahrermuster mehrmals wiederholt wird. Die Differenz der Emissionen des Teils des Zyklus, bei dem der Motor noch kalt ist, und jenes Teils mit betriebswarmem Motor ist der Kaltstartzuschlag.

Wegen der unterschiedlichen Hubräume und Leistungen der Fahrzeuge wurden nicht alle im gleichen Kaltstartzyklus getestet. Die drei Roller mit Hubraum bis 125 ccm wurden im Zyklus Scooter cold start (SC), die übrigen Fahrzeuge im Zyklus Motorbike cold

start (MC) gemessen. In beiden Zyklen wird ein Fahrmuster drei Mal wiederholt. Beim SC wurde eine verkürzte Version des FHB-Zentrums, beim MC der gekürzte Ausserortsteil des WMTC verwendet. Zusätzlich wurden die Fahrzeuge 4, 5, 6 und 10 im Innerortsteil des WMTC je einmal mit kaltem und warmem Motor gemessen. Diese Messungen fanden bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C statt.

Vor der Betrachtung der Kaltstartzuschläge werden zunächst die **absoluten Emissionen** der repetitiven Zyklen diskutiert. Erwartungsgemäss haben die Fahrzeuge mit geregelter Katalysator zu Beginn des Tests höhere Emissionen als gegen Ende, weil der Katalysator für eine Konvertierung zu kalt ist. Auch der Oxidationskatalysator der beiden Zweitakter muss für eine Konvertierung ein bestimmtes Temperaturniveau erreichen. Demnach müssten auch bei diesen Fahrzeugen die CO- und HC-Emissionen mit fortlaufender Bagnummer abnehmen. Bei HC ist das der Fall, bei CO für Fahrzeug 4 jedoch nicht.

Erstaunlich klein sind die Auswirkungen des Choke der unregulierten Fahrzeuge, dessen Aufgabe es ist, den Motor in kaltem Zustand durch Anfetten zu unterstützen. Erwartet wurden höhere CO- und HC-Emissionen, solange der Motor kalt ist. Es kann an der kleinen Motormasse liegen, die ein relativ geringes Anfetten erfordert, dass der Unterschied in den Emissionen von kaltem und warmem Motor nicht den Erwartungen entspricht.

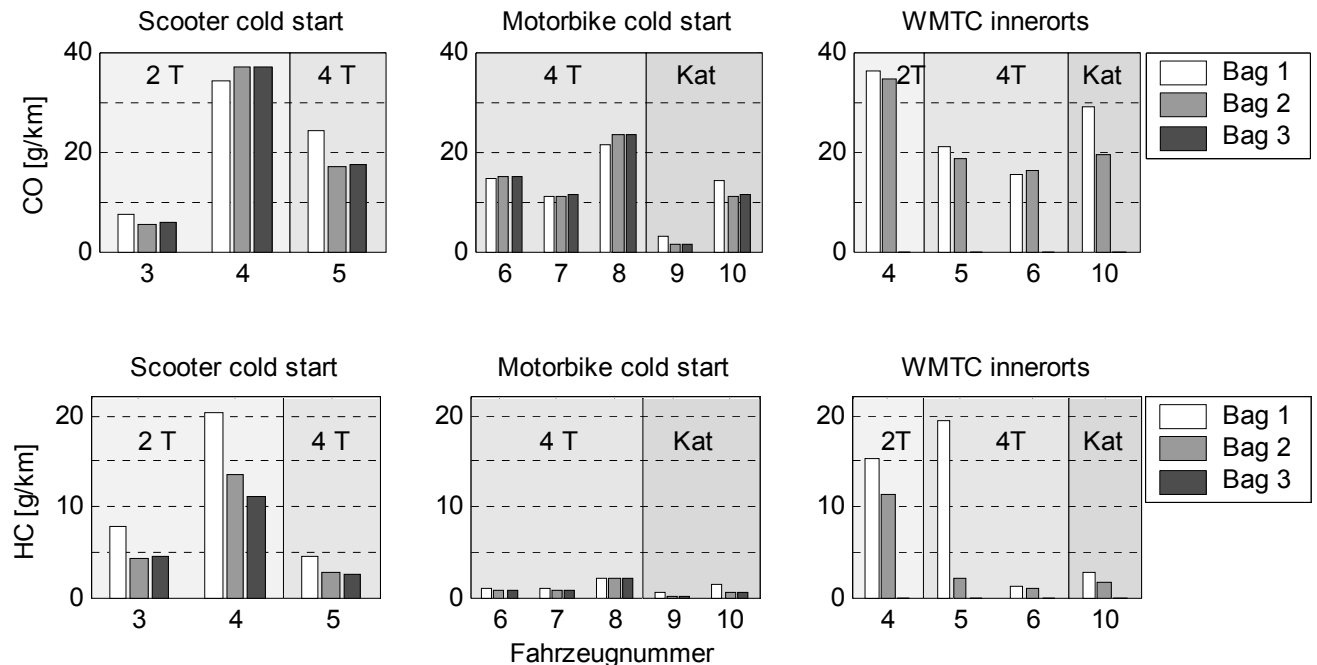


Abbildung 13: CO- und HC-Emissionen der kalten Zyklen

Die tiefen CO- und vor allem HC-Emissionen der im Zyklus MC gemessenen Fahrzeuge sind auffällig. Ein Grund hierfür liegt in der höheren Dynamik des Zyklus SC, ein weiterer in dessen relativ grossem Stopanteil. Weiter scheinen die Luft-Brennstoffverhältnisse

näher an 1 zu liegen, je flüssiger die Fahrt ist, denn der MC erzeugt mehr NO_x als die restlichen beiden Zyklen.

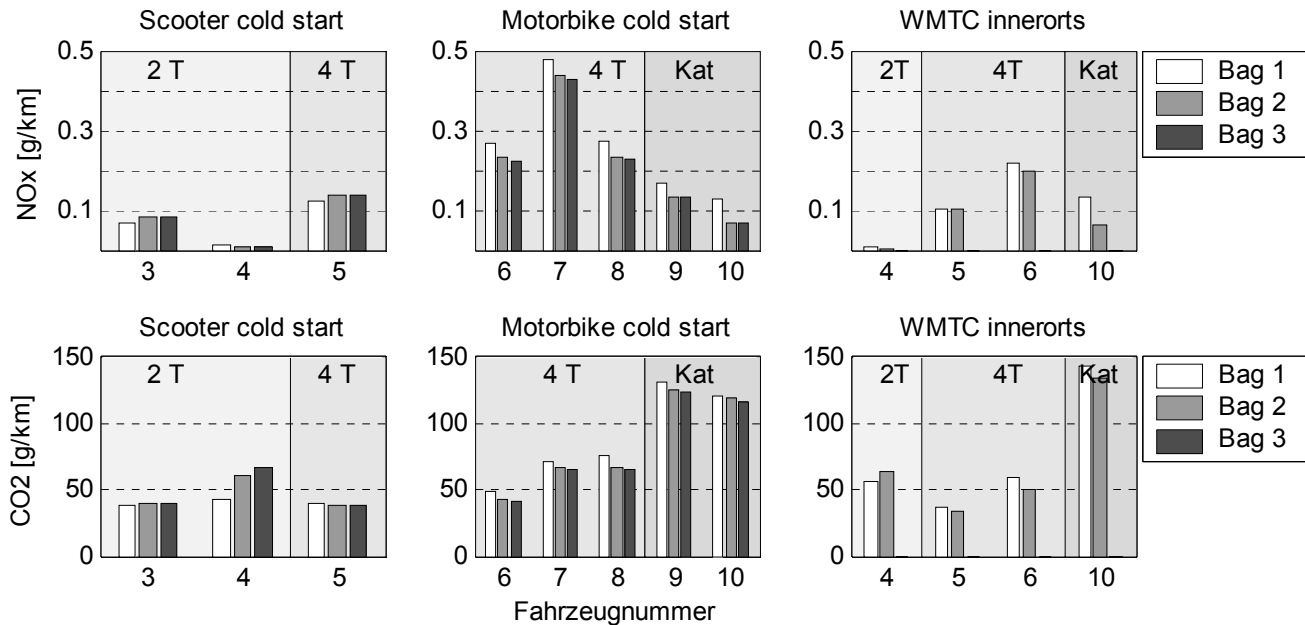


Abbildung 14: NO_x- und CO₂-Emissionen der kalten Zyklen

Aus der **Differenz der Emissionen** von kaltem und warmem Betrieb wird der Kaltstartzuschlag gebildet, der in Abbildung 15 dargestellt ist. Der Kaltstartzuschlag wird in Gramm pro Start angegeben. Es entstehen negative Zuschläge, wenn das Fahrzeug in kaltem Zustand weniger von einem Schadstoff emittiert als in warmem. Sofern der Katalysator intakt ist, sollte das Fahrzeug in warmem Zustand weniger emittieren als in kaltem, und der Zuschlag des Kaltstarts wäre positiv.

Für die Berechnung des Kaltstartzuschlags werden die Gleichungen (1) oder (2) verwendet. Die eingesetzten Variablen haben folgende Bedeutungen:

E_{kalt} : Kaltstartzuschlag

$E_{\text{Bag } n}$: Emission im n-ten Teilzyklus (Bag n) in g/km

$s_{\text{Bag } n}$: gefahrene Distanz im n-ten Teilzyklus (Bag n) in km

Mit Hilfe der Modaldaten liess sich erkennen, ab welchem Bag das Fahrzeug warm war. Sofern sich der Motor während des ersten Teils (Bag 1) eines Zyklus erwärmt hatte, wurde der Kaltstartzuschlag nach Gleichung (1) bestimmt.

$$E_{\text{kalt}} = E_{\text{Bag1}} * s_{\text{Bag1}} - \frac{1}{2} (E_{\text{Bag2}} * s_{\text{Bag2}} + E_{\text{Bag3}} * s_{\text{Bag3}}) \quad (1)$$

Wurde das Fahrzeug hingegen erst während der Fahrt für den zweiten Bag vollständig aufgewärmt, entsprach der Kaltstartzuschlag Gleichung (2).

$$E_{kalt} = E_{Bag1} * s_{Bag1} + E_{Bag2} * s_{Bag2} - 2 * E_{Bag3} * s_{Bag3} \tag{2}$$

Der Kaltstartzuschlag wurde für Fahrzeug 4 im SC und Fahrzeug 9 im MC nach Gleichung (2), für die Fahrzeuge 3, 5 bis 8 und 10 im SC resp. MC nach Gleichung (1) berechnet. Im WMTC waren für seine Berechnung im Unterschied zum SC und MC nur zwei Bags vorhanden. Daher wurde der Kaltstartzuschlag in diesem Zyklus für alle Fahrzeuge nach Gleichung (3) berechnet.

$$E_{kalt} = E_{Bag1} * s_{Bag1} - E_{Bag2} * s_{Bag2} \tag{3}$$

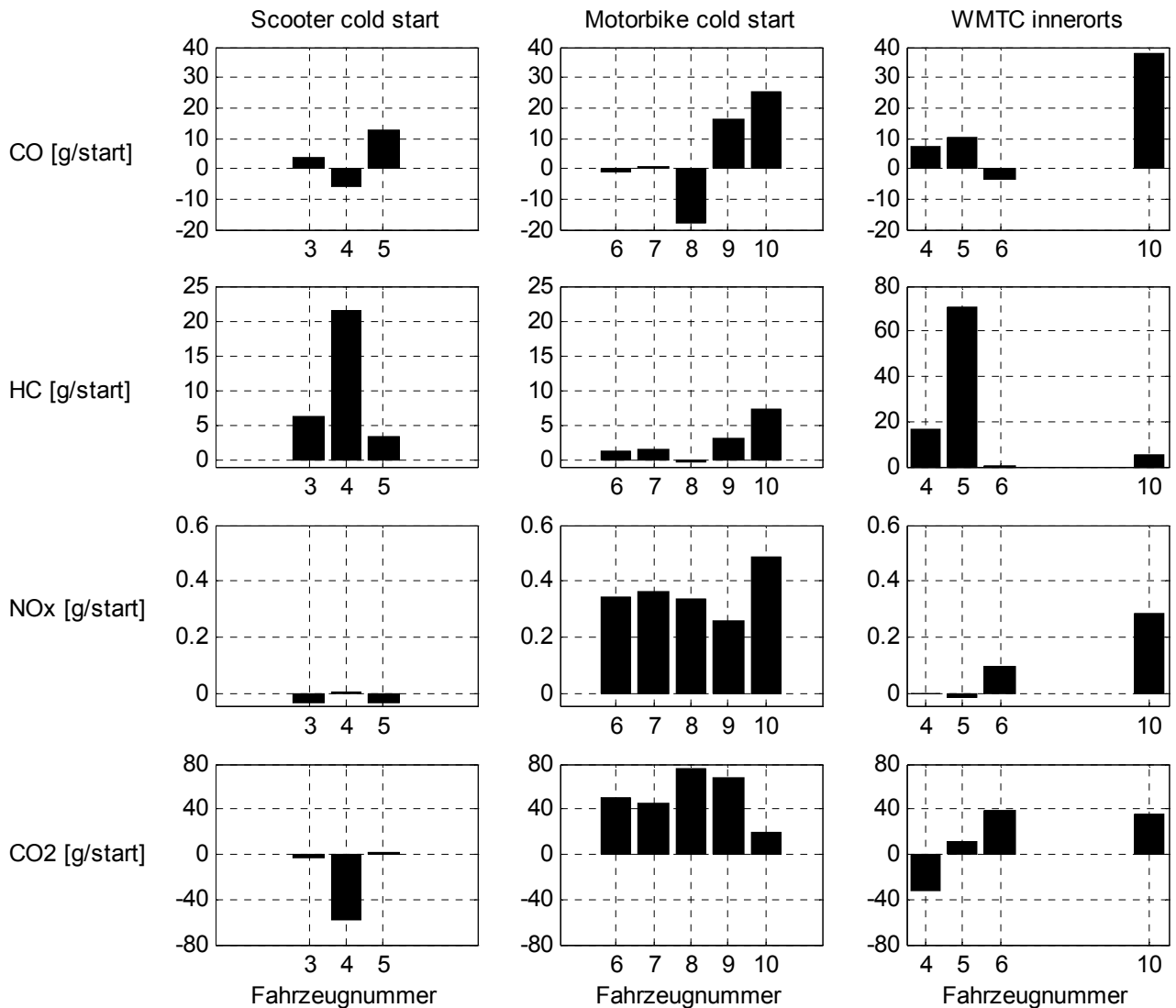


Abbildung 15: Kaltstartzuschläge

Erwartungsgemäss sind alle Kaltstartzuschläge der beiden Fahrzeuge 9 und 10 (mit ge-regeltem 3-Wege-Katalysator) positiv.

Fahrzeug 4 fällt mit negativem CO₂-Zuschlag sowohl im SC als auch im WMTC auf. Die zeitaufgelösten Messungen bestätigten, dass das Fahrzeug mit kaltem Motor tatsächlich weniger CO₂ emittiert als mit warmem. Der Grund für dieses Verhalten kann nur vermutet werden. Möglich ist eine Zunahme der Reibung im Motor bei Erwärmung, beispielsweise durch Ausdehnung des Kolbens. Es ist bekannt, dass bei Zweitaktern, wie bei diesem Fahrzeug, der Kolben bzw. die Kolbenringe nach einer Laufleistung von etwa 10'000 bis 15'000 Kilometern ausgetauscht werden müssen. Da die Laufleistung dieses Fahrzeugs bereits vor Beginn der Messungen die Obergrenze überschritten hatte, kann ein schadhafter Kolben nicht ausgeschlossen werden. Weiter ist es möglich, dass das stufenlose Wandlergetriebe dieses Fahrzeugs in kaltem Zustand anders (optimaler) übersetzt, oder dass es kalt eine höhere Effizienz aufweist.

Bei Fahrzeug 8 wurden negative CO- und HC-Kaltstartzuschläge festgestellt. Auch hier ist der Grund nicht genau bekannt, denn das Sekundärluftventil sollte sich vor allem auf die HC-Emissionen auswirken. Trotzdem kann ein Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden.

3.2.4.1 Vergleich mit Personenwagen

Zum Vergleich der Kaltstartzuschläge sind in nachstehender Tabelle die Zuschläge von 6 Personenwagen der Stufe Euro-0 aufgeführt. Benzinbetriebene Personenwagen der Stufe Euro-0 sind Fahrzeuge aus der Zeit vor 1988, die ohne geregelten 3-Wege-Katalysator betrieben wurden. Sie sind den Zweirädern technisch ähnlich. Die Zuschläge wurden anhand von Messungen berechnet, die im Jahr 2001 an der EMPA in einem repräsentativen repetitiven realen Zyklus bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C durchgeführt wurden [12].

Schadstoff	Zuschlag [g/km]
CO	87.5
HC	11.9
NO _x	-0.5
CO ₂	58.2

Tabelle 7: Mittlere Kaltstartzuschläge von 6 Euro-0 Personenwagen

Der Vergleich der Kaltstartzuschläge zwischen Motorrädern und Autos kann nicht ganz direkt erfolgen, da unterschiedliche Zyklen zu Grunde liegen. Trotzdem ist erkennbar, dass die Kaltstartzuschläge der Motorräder eher kleiner sind als jene der (technisch ähnlichen) Euro-0 Personenwagen. Dies ist einleuchtend, denn die Motoren der Zweiräder sind wesentlich kleiner und somit rascher aufgewärmt.

3.2.4.2 Vergleich Sommer- und Winterkaltstart

Zwei Fahrzeuge, die Nummern 6 und 7, wurden im Zyklus Motorbike cold start zusätzlich bei einer Umgebungstemperatur von 5 °C gemessen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 16.

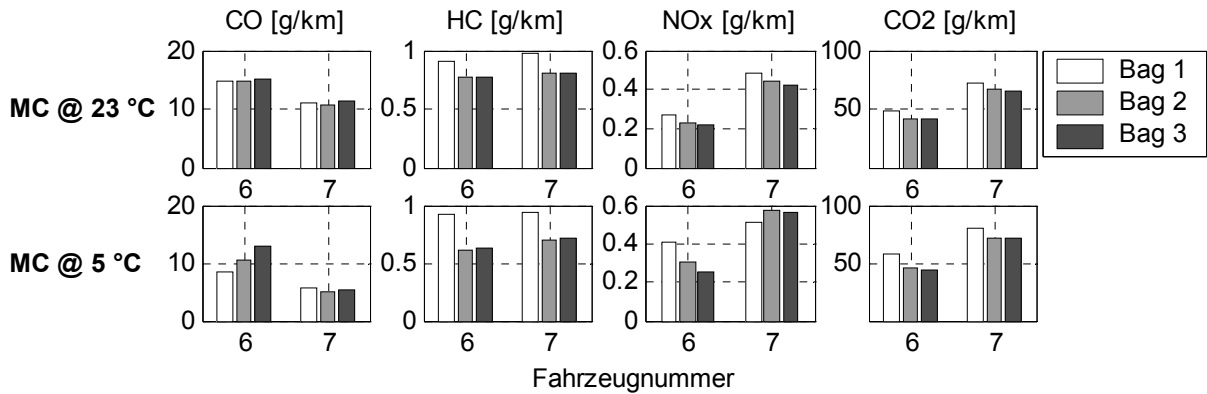


Abbildung 16: Emissionen Fahrzeuge 6 und 7 in Sommer- und Winterkaltstart

Die CO- und HC-Emissionen sind bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C erstaunlicherweise höher als bei 5 °C. Eine mögliche Ursache liegt in der geringeren Dichte warmer gegenüber kalter Luft. Bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C gelangt bei diesen einfachen Treibstoffsystemen ohne Luftmassenmessung und Lambdaeegelung vergleichsweise weniger Sauerstoff und Stickstoff in den Motor als bei 5 °C. Daher ist das Gemisch bei 23 °C fetter als bei 5 °C. Dies resultiert in höheren CO- und HC- und in tieferen NO_x-Emissionen bei höherer Temperatur. Dieser Effekt wird noch verstärkt, indem sich im Winterkaltstart mehr Treibstoff an den kalten Motorwänden niederschlägt.

Abbildung 17 zeigt die Kaltstartzuschläge der beiden Fahrzeuge bei den verschiedenen Umgebungstemperaturen. Auffällig ist der Absolutbetrag des Zuschlags bei 5 °C, der immer grösser ist als der entsprechende Zuschlag bei 23 °C.

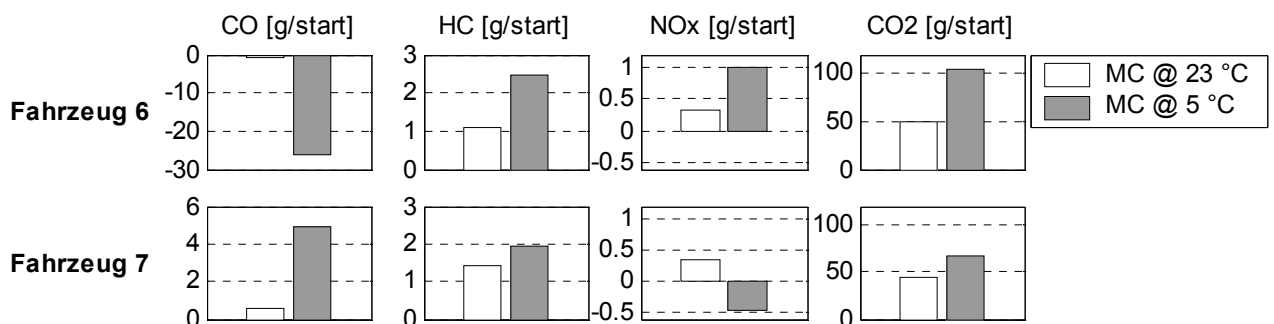


Abbildung 17: Kaltstartzuschläge der Fahrzeuge 6 und 7 in Sommer- und Winterkaltstart

Die Dauer der Kaltstartphase konnte mit Hilfe der zeitaufgelösten Emissionsdaten bestimmt werden. Für Fahrzeug 6 dauert es bei der Umgebungstemperatur von 23 °C rund fünf Minuten, während bei 5 °C rund sechs Minuten vergehen, bis das Fahrzeug warm ist. Bei Fahrzeug 7 vergehen etwa sieben (bei 23 °C) bzw. siebeneinhalb Minuten

(5 °C). Wie erwartet, dauert die Kaltstartphase bei einer Umgebungstemperatur von 5 °C länger, und es wird mehr Treibstoff benötigt, um die Motorreibung in dieser Phase zu überwinden. Deshalb sind die CO₂-Kaltstartzuschläge bei 5 °C grösser als bei 23 °C. Durch die längere Dauer mit "kalten" Wänden sind auch die HC-Emissionen höher.

3.2.4.3 Vergleich mit Fahrzeugen 1 und 2

Im Jahr 2001 wurden an der EMPA und der Fachhochschule Biel Messungen an 2 Zweirädern durchgeführt ([2] und [4]). Diese Fahrzeuge tragen die Nummern 1 und 2, deren Daten in Tabelle 8 enthalten sind. Ziel dieser Messungen war die Untersuchung von Kaltstarts. An der EMPA wurden beide Fahrzeuge im Winter- und Fahrzeug 2 auch im Sommerkaltstart getestet. Der Sommerkaltstarttest für Fahrzeug 1 wurde an der Fachhochschule Biel durchgeführt. Fahrzeug 1 war ein Motorrad, weshalb der Kaltstartzyklus Motorbike cold start (MC) verwendet wurde. Fahrzeug 2 hingegen war ein Roller und wurde im Zyklus Scooter cold start (SC) getestet.

Fzg-Nr.	MVF-01	SV7-02
Marke und Modell	Suzuki GSX 750F	BMW C1
Typ	Motorrad	Roller
1. Inbetriebnahme	1991	2000
Emissionsklasse	FAV3	97/24/EG
Hubraum [ccm]	748	125
Arbeitsweise (Anzahl Takte)	4	4
Vergaser/Einspritzung	Vergaser	Einspritzung
Choke	manuell	kein
Abgasnachbehandlung	Sekundärluftventil	3-Wege-Katalysator
Getriebe	6 Gänge	Variomat
max. Leistung [kW]	54.4	11
bei Drehzahl [U/min]	7000	9250
max. Geschwindigkeit [km/h]	240	103
Laufleistung [km]	44'347	4'000
Kühlung	Öl	Wasser
Gewicht [kg]	230	185

Tabelle 8: Daten der Fahrzeuge 1 und 2

Diese beiden Fahrzeuge bestätigen die Trends der Fahrzeuge 6 und 7. Die Kaltstartzuschläge von CO₂, HC und CO nehmen bei tiefer Temperatur markant zu.

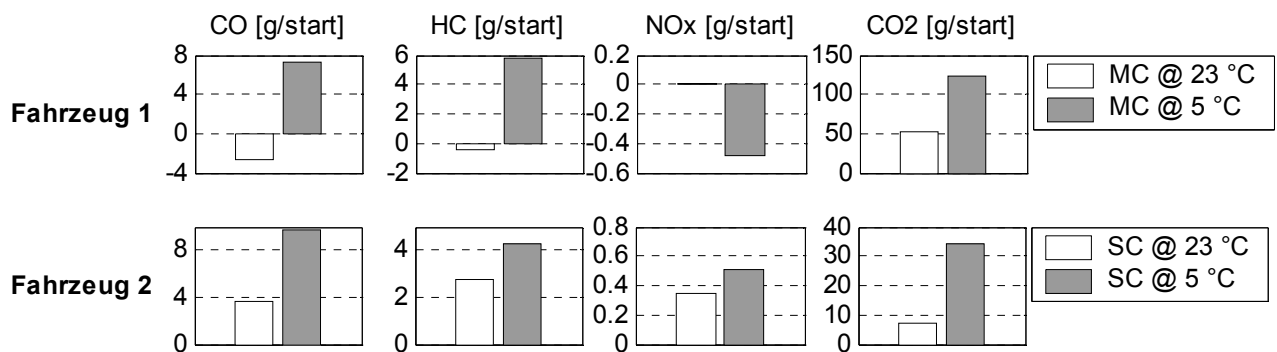


Abbildung 18: Kaltstartzuschläge Fahrzeuge 1 und 2 in Sommer- und Winterkaltstart

3.3 Schadstoffberechnung mit Emissionsmodell

In diesem Kapitel wird zunächst das an der EMPA entwickelte Modell zur Berechnung von Emissionen vorgestellt. Um die Qualität des Modells zu überprüfen, werden die Rechenergebnisse anschliessend mit gemessenen Werten verglichen.

3.3.1 Zweck und Aufbau des Modells

Im Rahmen der D.A.CH.-Kooperation und des internationalen EU-Forschungsprojekts ARTEMIS wurde an der EMPA ein Modell zur Berechnung von Emissionen entwickelt ([9] und [10]). Auf der Basis gemessener Emissionen, die während mehrerer auf dem Rollenprüfstand gefahrener Zyklen entstehen, wird von jedem Fahrzeug ein Modell erstellt. Emissionen nicht vermessener Zyklen können anschliessend, basierend auf diesem Modell, berechnet werden. Dabei beschränkt man sich zur Zeit auf die limitierten Schadstoffe CO, HC und NO_x sowie den Ausstoss von CO₂ resp. den Verbrauch.

Für die Erstellung des Modells werden die zeitaufgelösten Messungen verwendet. Frühere Modelle anderer Gruppen basierten auf Messungen mit der Frequenz von 1 Hz. Hohe Emissionsspitzen entstehen vor allem in transienten Vorgängen wie Lastwechsel, Drehzahländerung u.a., deren Dauer durchaus unter einer Sekunde sein kann. Eine zeitliche Auflösung von 1 Hz (1 Abtastung pro Sekunde) ist für die Detektion solcher Vorgänge zu gering. Daher basiert das Modell der EMPA auf Messungen mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Hz (10 Abtastungen pro Sekunde).

Die gasförmigen Emissionen werden durch Schläuche und Rohre vom Auspuff zu den Analysatoren geleitet. Ein Ereignis wird durch den Transport und die Auswertung zeitlich verschoben und in seiner Form verschmiert. Dieser Tiefpass-Charakter und die Totzeit des Gastransports werden für die Messanordnung erfasst. In der dynamischen Korrektur der Emissionssignale wird der Einfluss des Gastransports weitgehend rückgän-

gig gemacht. Diese Signalkorrektur muss vor der Modellbildung vorgenommen werden.

Innermotorische Prozesse sind für die Bildung von Emissionen massgebend. Es gibt Modelle, die Emissionen als Kennfeld in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und dem Produkt von Geschwindigkeit und Beschleunigung abbilden (siehe [9]). Solche Modelle haben den Nachteil, den Zusammenhang von motorischen Prozessen und Emissionsbildung unvollständig wiederzugeben. So ist es zum Beispiel schwierig, durch Lastwechsel verursachte Emissionsspitzen mit dem Geschwindigkeitsverlauf in Korrelation zu setzen.

Das an der EMPA entwickelte Modell basiert deshalb auf einem Motorenkennfeld, das die Emissionen in Abhängigkeit von Drehzahl und mittlerem Kolbendruck (normiertes Drehmoment) wiedergibt. Die Emissionen werden demnach als unmittelbare Folgen motorischer Prozesse abgebildet. Das Ergebnis sind simulierte zeitaufgelöste Emissionen, die wie die entsprechenden gemessenen Daten zu Bags und Subbags integriert werden können.

Die tatsächlich vom Fahrzeug emittierten Abgase weichen jedoch von denjenigen ab, die im Brennraum erzeugt werden, wenn das Fahrzeug ein System zur Abgasnachbehandlung hat. Das Teilmodell, das ein solches System abbildet, befindet sich noch in Entwicklung. Auch das Kaltstartverhalten des Motors kann (noch) nicht modelliert werden.

3.3.2 Validierung, Vergleich berechneter und gemessener Emissionsfaktoren

Mit dem Modell wurden zeitaufgelöste Emissionen für die Dauer einer Bagmessung simuliert. Aufintegriert lieferten die Berechnungen daher simulierte Integraldaten über einen Bag. Um die Qualität des Modells zu überprüfen, werden hier die simulierten mit den gemessenen Integraldaten in Diagrammen verglichen. Es geht an dieser Stelle also nicht um die Benutzung dieses Modells, sondern vielmehr um seine Validierung, also um eine Kontrolle seiner Vorhersagegenauigkeit.

Weil das Modell das Kaltstartverhalten des Fahrzeugs nicht abbilden kann, wurden für seine Bildung nur zeitaufgelöste Daten von Bags resp. Teilzyklen genommen, die mit betriebswarmem Motor gestartet wurden. Nachstehende Tabelle zeigt, bei welchen Fahrzeugen welche Teilzyklen für die Modellierung verwendet wurden. Für die Modellierung der Fahrzeuge wurde, ausgehend von der Kraft am Rad, der mittlere Kolbendruck berechnet. Da diese Berechnung für Fahrzeuge mit variablem Übersetzungsverhältnis nicht möglich ist, konnten nur die Motorräder, also die Fahrzeuge 7 bis 10, die über eine manuelle Gangschaltung verfügen, modelliert werden.

Teilzyklus		Fahrzeug 7	Fahrzeug 8	Fahrzeug 9	Fahrzeug 10
UDC	Bag 2	X	X	X	X
FHB	Zentrum	X	X	X	X
	Peripherie	X	X	X	X
	Überland	X	X	X	X
CADC	innerorts	X	X	X	X
	ausserorts	X	X	X	X
	Autobahn	X	X	X	X
WMTC	ausserorts				X
	Autobahn				X
	innerorts, warm				X
Motorbike cold start	Bag 2	X	X	X	X
	Bag 3	X	X	X	X

Tabelle 9: Für Modellierung verwendete Teilzyklen

Von jedem Fahrzeug wurde aus zeitaufgelösten Emissions-Messdaten aus $n-1$ Teilzyklen ein Modell erstellt, mit dem die Daten des n -ten Teilzyklus simuliert wurden. Daher wurden für jedes Fahrzeug anhand von zeitaufgelösten Messungen in n Teilzyklen auch n Modelle gebildet.

In den folgenden Diagrammen werden die aufintegrierten Ergebnisse jeder Simulation den entsprechenden Integraldaten gegenübergestellt. In absoluter Übereinstimmung von Messung und Simulation würde jeder Punkt auf einer Geraden im Winkel von 45° liegen. Solch eine Übereinstimmung findet sich jedoch nicht einmal zwischen zwei Messungen: Die Wiederholgenauigkeit einer Messung mit gleichem Fahrzeug, demselben Fahrer und gleichem Prüfstand liegt bei etwa 20 %. Daher ist man im Bereich der Emissionsmodellierung mit einer Modellgenauigkeit von 20 % zufrieden. Aus diesem Grund wurde dieser Bereich mit gestrichelten Linien in die Diagramme eingezeichnet.

Eine wesentliche Bedingung für eine gute Simulation ist die Abdeckung des Bereichs, in dem sich Drehzahl und mittlerer Kolbendruck der Simulation befinden, durch Messungen in anderen Teilzyklen. Der Bereich von Drehzahl und Kolbendruck des Autobahn-Abschnitts des CADC wird jedoch von keiner andern Messung abgedeckt, so dass dieser Teilzyklus nicht simuliert werden kann.

Fahrzeug 7

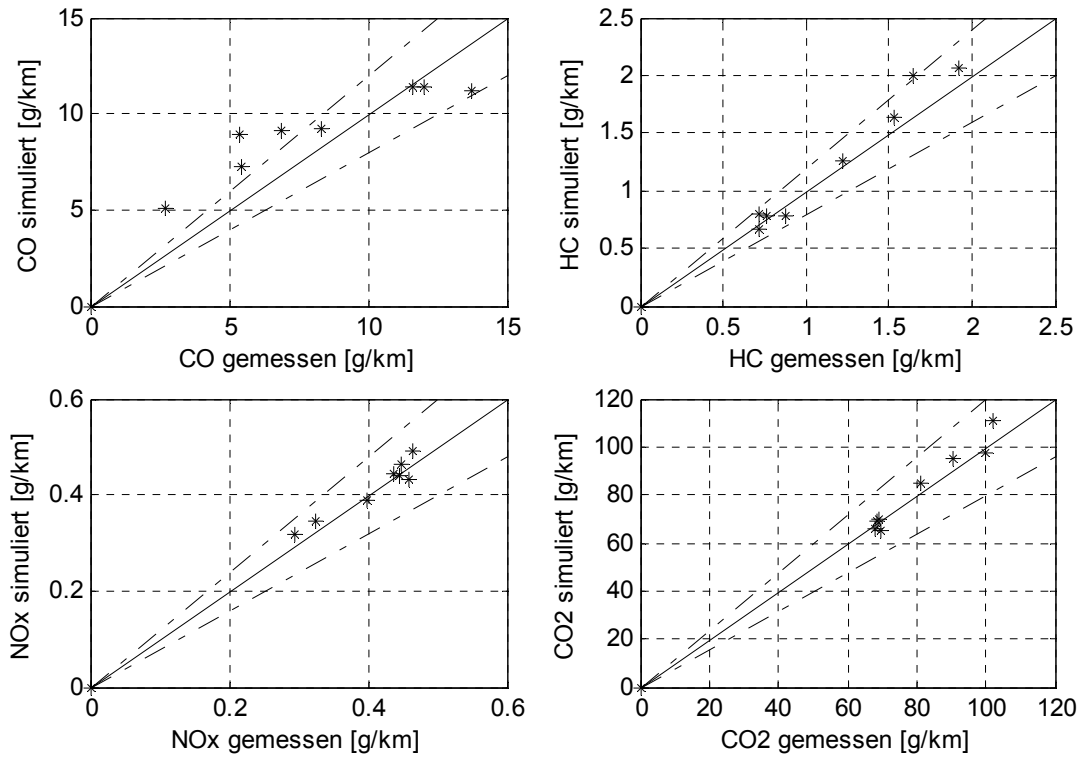


Abbildung 19: Modellergebnisse des Fahrzeugs 7

Fahrzeug 8

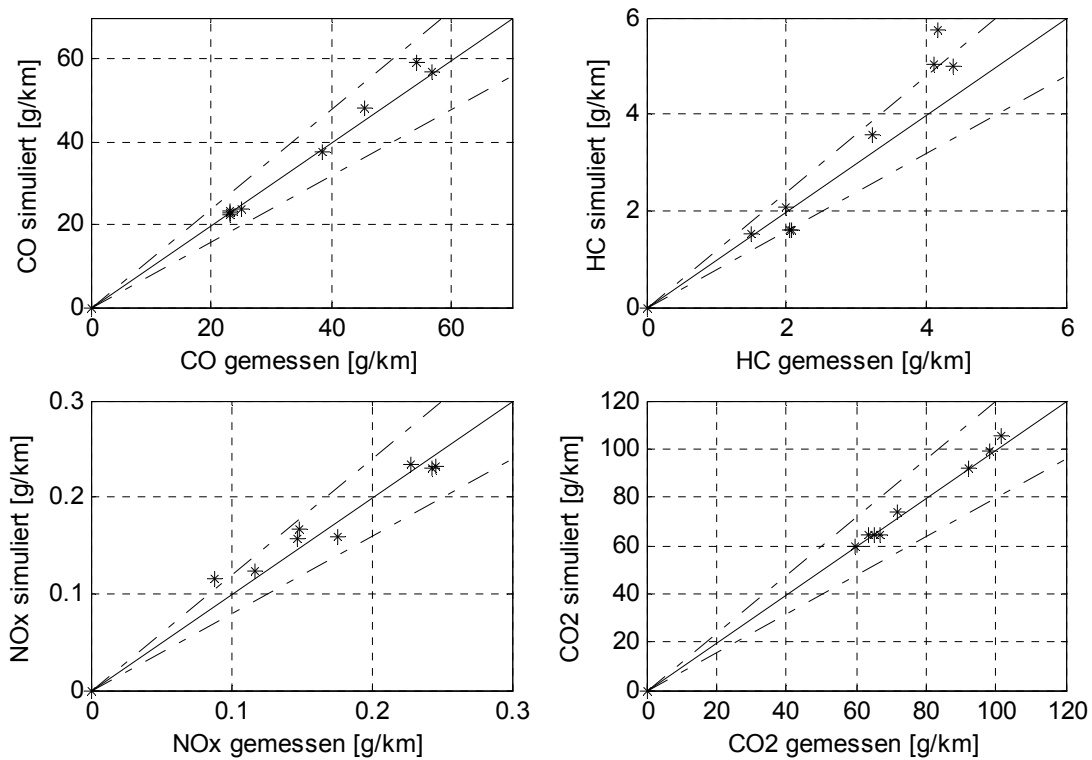


Abbildung 20: Modellergebnisse des Fahrzeugs 8

Fahrzeug 9

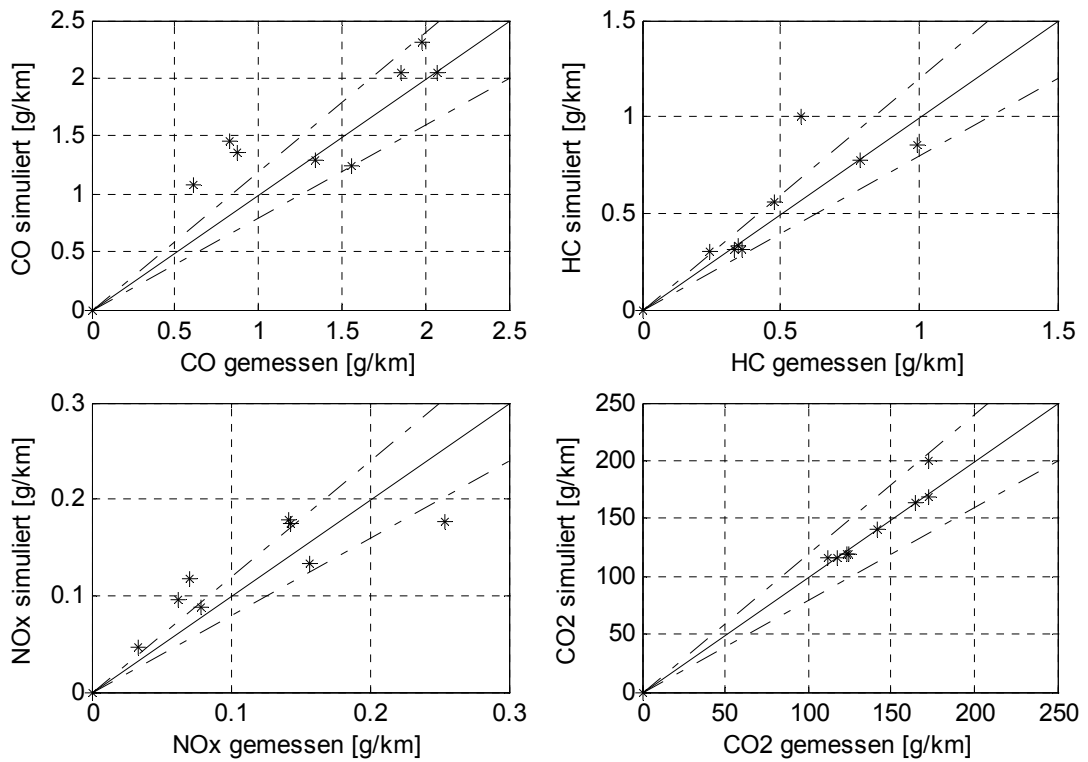


Abbildung 21: Modellergebnisse des Fahrzeugs 9

Fahrzeug 10

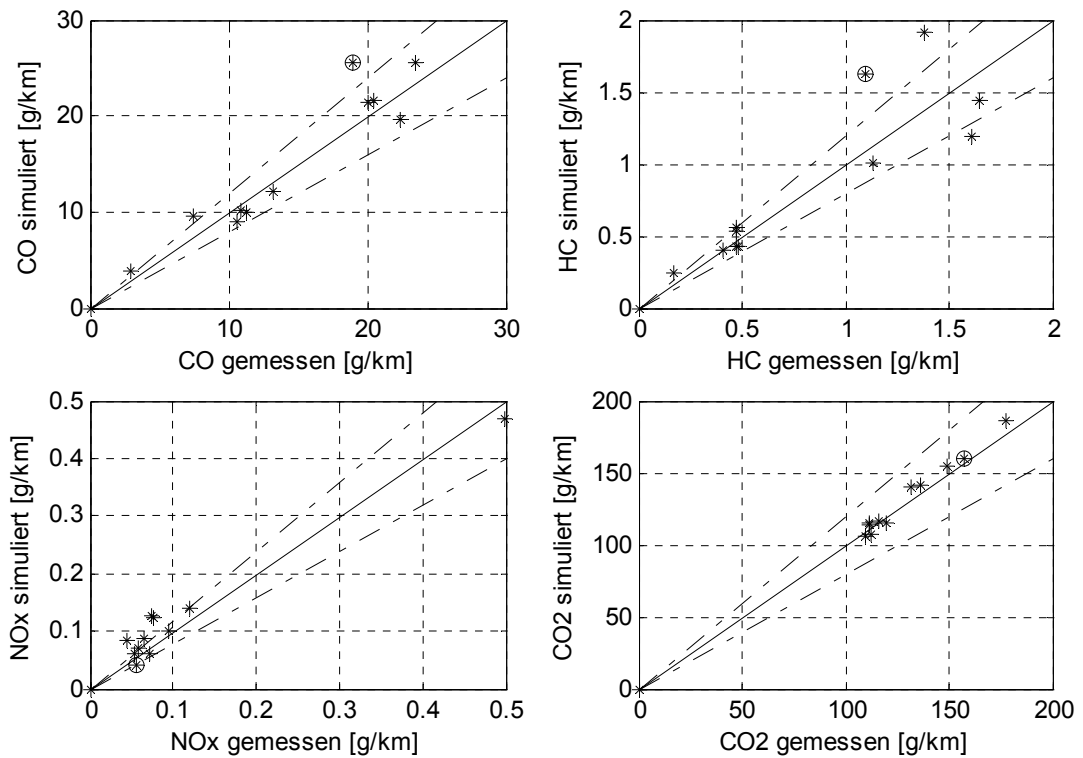


Abbildung 22: Modellergebnisse des Fahrzeugs 10

Die Abweichung der Simulation vom Messergebnis ist grösser als bei den Personenwagen. Dies kann damit zusammenhängen, dass für die Modellierung der Personenwagen zusätzlich die Ableitung des Saugrohrdrucks als unabhängige Dynamikgrösse verwendet wird. Bei den Zweirädern konnte der Saugrohrdruck nicht gemessen und seine Ableitung daher nicht für die Modellierung eingesetzt werden. Ausserdem wurden die Emissionen der Zweiräder in verdünntem Abgas gemessen, wohingegen bei Personenwagen Messungen im Rohgas für die Modellierung verwendet werden. Schliesslich sind auch die Kräfte der Zweiräder auf dem Rollenprüfstand kleiner, wodurch deren Messung ungenau wird. Für gewisse Fragestellungen ist die Vorhersagequalität des Modells aber absolut zufriedenstellend.

Die Modellierung von Fahrzeug 7 zeigt im Allgemeinen gute Ergebnisse. Der Grund für die Überschätzung bei der Berechnung von CO ist nicht bekannt. Auch Fahrzeug 8 konnte bis auf die Emissionen von HC gut modelliert werden. Das Fahrzeug hat ein Sekundärluftventil, so dass HC noch im Auspuff nachoxidiert werden. Abgasnachbehandlungssysteme können beim heutigen Stand des Modells nicht simuliert werden, wodurch hier die Unsicherheit in der Berechnung von HC-Emissionen erklärt werden kann.

Die Fahrzeuge 9 und 10 haben ebenfalls Abgasnachbehandlungssysteme. Der 3-Wege-Katalysator des Fahrzeugs 9 ist vermutlich funktionstüchtig, so dass auch hier die Simulation wie erwartet bei allen drei Schadstoffen CO, HC und NO_x von der Messung teilweise abweicht. Fahrzeug 10 besitzt ebenfalls einen 3-Wege-Katalysator, die Simulationen weichen jedoch weniger stark von den Messungen ab. Bei diesem Motorrad fallen zudem die Abweichungen zwischen Simulation und Messung im legislativen Zyklus UDC auf. Die betreffenden Punkte sind in der entsprechenden Abbildung mit einem Kreis gekennzeichnet. In der Tabelle 10 sind die Werte mit den prozentualen Abweichungen der Berechnung gegenüber der Messung aufgelistet.

Schadstoff	Messung [g/km]	Simulation [g/km]	Abweichung
CO	18.9	25.5	35%
HC	1.09	1.63	49%
NO _x	0.0563	0.0416	-25%
CO ₂	157.3	159.8	1.6%

Tabelle 10: Fahrzeug 10, legislativer Zyklus UDC: Vergleich Messung und Simulation

Bei der Analyse dieser Daten fielen vor allem zwei Dinge auf: Zum einen werden grössere CO- und HC, jedoch kleinere NO_x-Emissionen gemessen, als sie das Modell berechnet, zum andern ist der UDC der einzige Zyklus des Fahrzeugs 10, dessen Emissionen diese Systematik mit deutlicher relativer Abweichung zwischen Messung und Simulation zeigen.

Jedes Modell des Fahrzeugs basiert auf Messungen in anderen Teilzyklen als dem simulierten. Da die Simulation mehr CO und HC und weniger NO_x berechnet als tatsächlich

gemessen wurde, kann vermutet werden, dass das Gemisch in anderen Teilzyklen fetter ist als im UDC. Daher liegt die Vermutung nahe, dass der legislative Prüfzyklus vom Fahrzeug auf dem Prüfstand erkannt wird und dieses in einem Modus mit tieferen Schadstoffen fährt. Ausserhalb des Prüfzyklus jedoch ist das Fahrzeug für eine andere Strategie ausgelegt. Von Motorrädern erwartet der Fahrer eine hohe Dynamik, daher würde ein eher fettes Gemisch ausserhalb des Prüfzyklus, so betrachtet, sinnvoll sein.

3.4 Benzolemissionen in realen Zyklen (C₆H₆)

Benzol ist eine krebserregende Substanz, und der Benzolausstoss von Zweirädern liefert einen relevanten Beitrag an die Belastung der Aussenluft. Verglichen mit den Werten der neuesten Personenwagen-Generationen (Euro-3 Benzin und Euro-2 Diesel) sind die Emissionen der Zweiräder als sehr hoch einzustufen.

3.4.1 Benzolemissionen im CADC-Zyklus (warm)

Abbildung 23 zeigt die Benzol-Emissionsfaktoren [mg/km] für die drei Phasen des mit betriebswarmem Motor gestarteten CADC-Zyklus. Die Benzolemissionen der Zweitakter sind deutlich höher als jene der Viertakter. Dagegen zeigen die Viertakter mit Katalysator keine deutliche Verbesserung gegenüber den Viertaktern ohne Katalysator. Verglichen mit den benzinbetriebenen Personenwagen der Euro-3-Technologie emittieren auch die Viertakter ein Vielfaches an Benzol. Im CADC-Zyklus erreichen die Personenwagen Benzol-Emissionsfaktoren im Bereich von 0.3, 1.6 und 3.1 mg/km für die Phasen ‚innerorts‘, ‚ausserorts‘ und ‚Autobahn‘. Die Zweiräder emittieren somit in den drei Phasen des CADC etwa 120 bis 2750, 10 bis 200 und 2 bis 25 Mal mehr Benzol als die PW. Die Emissionsfaktoren aller Zweiräder (inkl. Viertakter mit Katalysator) nehmen im Mittel von der ersten Phase (innerorts) über die zweite (ausserorts) zur dritten Phase (Autobahn) ab. Dagegen steigen die Benzolemissionen der Personenwagen mit der Geschwindigkeit.

Fahrzeug 4 (2-Takter) emittiert überdurchschnittlich stark. Dieser Roller belastete die Messgeräte und natürlich auch die Umwelt für alle gemessenen Schadstoffe und Zyklen mit Abstand am stärksten. Die Benzolemissionen waren mit 860 mg/km (Phase ‚innerorts‘) fast 12 Mal höher als der tiefste Wert (73 mg/km) und fast 3000 Mal höher als die mittleren Benzolemissionen der benzinbetriebenen Personenwagen der Stufe Euro-3.

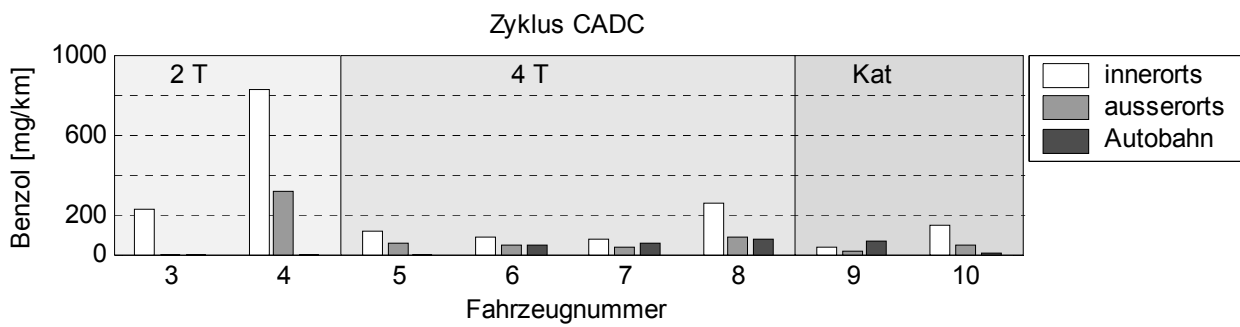


Abbildung 23: Benzol-Emissionen im Zyklus CADC

Abbildung 24 zeigt die Varianz der Benzol/HC-Verhältnisse für die verschiedenen Zweiradkonzepte in den drei Phasen des Zyklus CADC. In allen Fällen liegt das Benzol/HC-Verhältnis über 4 Massen-%. Der hohe Benzolgehalt von 3.0 Vol-% im Treibstoff widerspiegelt sich somit auch im Abgas. Der Benzolanteil variiert um fast einen Faktor 3 (von 4 bis 11 %) innerhalb der Motorradflotte. Mit Ausnahme von Fahrzeug 10 nehmen die Benzol/HC-Anteile mit steigender Geschwindigkeit zu. Dies deutet auf eine motorische Bildung von Benzol bei hoher Motorlast (Autobahnfahrt) hin. Die Einführung des geregelten 3-Wege-Katalysators hat bei den Personenwagen vor allem bei Autobahnfahrten zu einem erhöhten Benzol/HC-Verhältnis geführt [13]. Nur eines der beiden Fahrzeuge mit geregeltem 3-Wege-Katalysator (Fahrzeug 10) zeigte gegenüber den Zweirädern ohne Katalysator resp. mit Oxidationskatalysator erhöhte Benzol/HC-Verhältnisse von über 10 Massen-%, aber nur bei den Teilzyklen ‚innerorts‘ und ‚ausserorts‘.

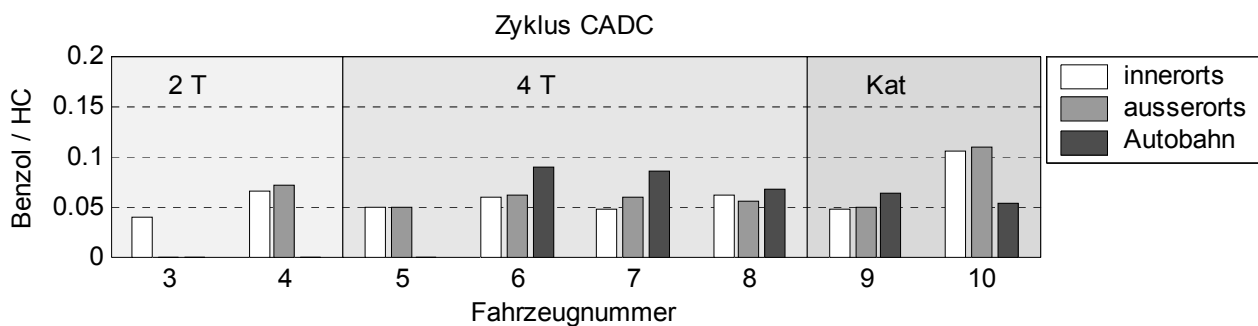


Abbildung 24: Verhältnisse von Benzol zu HC im Zyklus CADC

3.4.2 Benzolemissionen in den Zyklen SC und MC (kalt)

Abbildung 25 beschreibt die Benzol-Emissionsfaktoren [mg/km] in den Zyklen Scooter cold start (SC) und Motorbike cold start (MC). In beiden Zyklen wird ein Fahrmuster drei Mal wiederholt, wobei der Zyklus mit kaltem Motor gestartet wird. Die Benzol-emissionen sind bis auf Fahrzeug 8 in der ersten Phase, welche den Kaltstart enthält,

höher als in den nachfolgenden. Abbildung 25 zeigt, dass die Motorräder weniger Benzol emittieren als die Roller.

Die Unterschiede zwischen den Phasen 1 und 3 sind bei den Fahrzeugen ohne Katalysator bzw. Fahrzeugen mit Oxidationskatalysator deutlich geringer als bei den beiden Motorrädern 9 und 10 mit geregelterm 3-Wege-Katalysator. Wie im CADC emittiert Fahrzeug 4 (Roller, Zweitakter) auch im SC deutlich mehr Benzol als alle anderen Fahrzeuge. Auch im SC bzw. MC variieren die Benzolemissionen deutlich. Die Emissionen sind im ersten Bag im Mittel etwa gleich hoch wie im Innerortsteil des CADC.

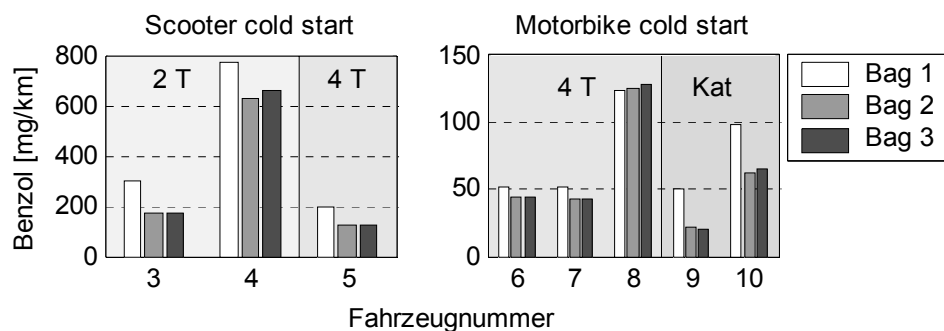


Abbildung 25: Benzol-Emissionen in den Zyklen SC und MC

Ausser Fahrzeug 8 zeigen alle Zweiräder erhöhte Benzolemissionen unter Kaltstarteinfluss. Diese Effekte sind am stärksten bei den Motorrädern mit geregelterm 3-Wege-Katalysator ausgeprägt. Diese klare Abhängigkeit ist zu erwarten, da der Katalysator erst oberhalb der Anspringtemperatur Wirkung zeigt. Es ist nicht klar, weshalb die Emissionen bei Fahrzeug 8 bei warmem Motor höher sind als beim kalt gestarteten. Eine ähnliche Abhängigkeit wurde auch für die HC-Emissionen von Fahrzeug 8 beobachtet.

Die Benzol/HC-Verhältnisse der Zweitakter und der Viertakter ohne Katalysator liegen im Bereich von 4 - 6 % (Abbildung 26). Sie ändern trotz Kaltstarteinfluss nur wenig während den drei Wiederholungen. Dagegen zeigen die Viertakter mit geregelterm 3-Wege-Katalysator erhöhte Benzol/HC-Verhältnisse im Bereich von 7 - 14 %. Vor allem bei warmem Motor (Bag 2 und 3) sind die Verhältnisse mit 10 - 14 % deutlich erhöht. Eine vergleichbare Erhöhung der Benzol/HC-Verhältnisse hat die Einführung der Katalysorteknik auch bei den Personenwagen bewirkt [14].

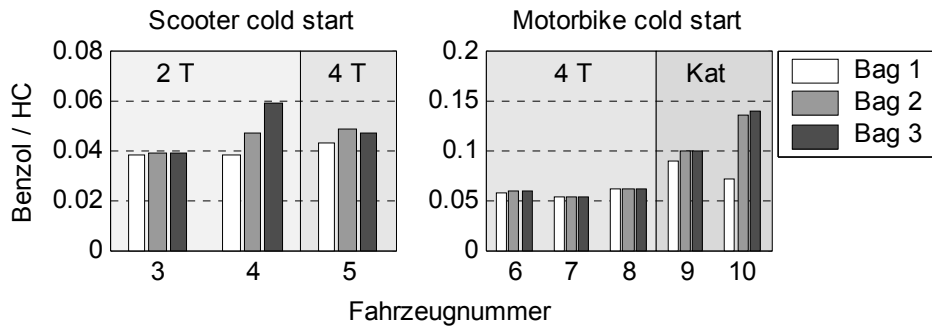


Abbildung 26: Verhältnisse von Benzol zu HC in den Zyklen SC und MC

Die beobachtete, relative Anreicherung von Benzol im Abgas der Motorräder mit 3-Wege-Katalysator deutet auf eine partielle Benzolbildung im Katalysator hin. Eine Katalysator-induzierte Benzolbildung wurde auch am 3-Wege-Katalysator von Personenwagen nachgewiesen.

Die Benzolemissionen, welche dem Kaltstart der Motorräder zugeschrieben werden können, sind in Abbildung 27 wiedergegeben. Die Kaltstartzuschläge der Fahrzeuge 4 und 9 wurden nach Gleichung (2), die Zuschläge der übrigen Fahrzeuge nach Gleichung (1) berechnet.

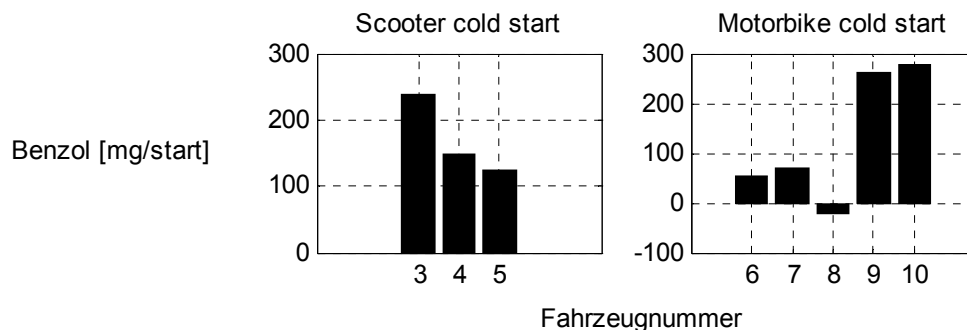


Abbildung 27: Kaltstartzuschläge von Benzol in den Zyklen SC und MC

Ausser bei Fahrzeug 8 zeigen alle Motorräder erhöhte Benzolemissionen unter Kaltstarteinfluss. Die Unterschiede zwischen kaltem und warmem Motorzustand sind bei den zwei Motorrädern mit geregelter 3-Wege-Katalysator (Fahrzeuge 9 und 10) am grössten. Motorrad 8 hatte in der ersten Phase einen geringeren Emissionsausstoss als in der dritten, so dass ein negativer Kaltstartzuschlag resultiert.

3.5 Methan in realen Zyklen

Methan wurde mit dem CI-MS 500 im Xenon-Modus (Xe^+) mit einer Nachweisgrenze von 150 ppb bzw. einer Bestimmungsgrenze von 450 ppb gemessen. Da durch die CVS-Methodik das Motorradabgas mit Aussenluft verdünnt wird, ist der Methangehalt (ca. 1.7 ppm) der Aussenluft zu berücksichtigen. Alle Motorräder emittierten Methan in Konzentrationen deutlich über 2 ppm.

3.5.1 Methan im CADC-Zyklus (warm)

In Abbildung 28 sind die Methan Emissionsfaktoren [mg/km] der Motorräder im warm gestarteten Zyklus CADC wiedergegeben, unterteilt in 2-Takt-, 4-Takt- und Fahrzeuge mit geregelterm 3-Wege-Katalysator.

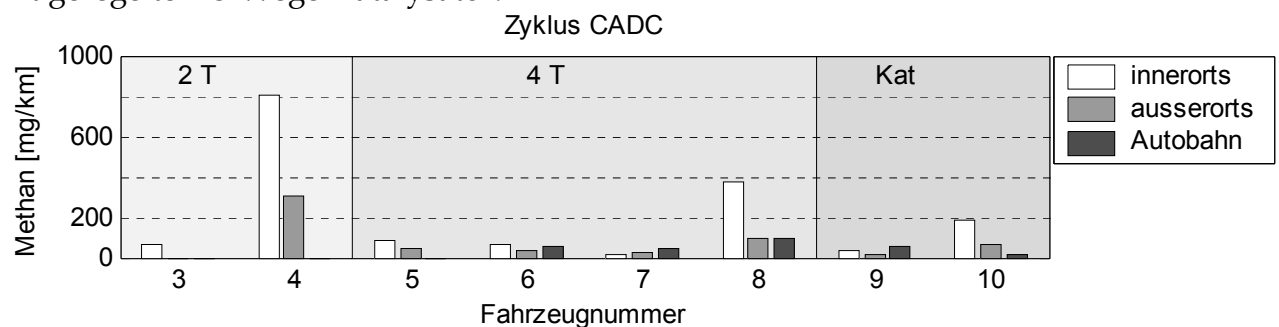


Abbildung 28: Methan-Emissionen im Zyklus CADC

Auch die Methanemissionen variieren für die einzelnen Fahrzeuge um etwa eine Größenordnung. Im Mittel sind die Emissionsfaktoren von Methan im tiefen Geschwindigkeitsbereich des Stadtverkehrs höher als ausserorts oder auf der Autobahn. Der Methanausstoss von Fahrzeug 4 ist ähnlich wie bei anderen Kohlenwasserstoffen signifikant höher als für die anderen Zweiräder. Wie schon für die Benzolemissionen gezeigt wurde, sind auch die Methanemissionen der Motorräder mit geregelterm Katalysator nicht signifikant verbessert gegenüber jenen der 4-Takter ohne Abgasnachbehandlung.

In Abbildung 29 wird der Methan/HC-Anteil in den drei Phasen des CADC verglichen. Die Motorräder werden wiederum in 2-Takter, 4-Takter und Fahrzeuge mit geregelterm 3-Wege-Katalysator unterteilt.

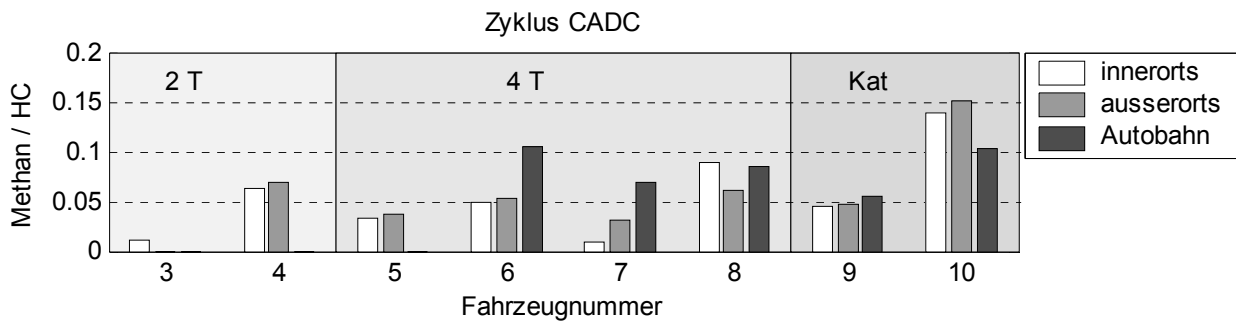


Abbildung 29: Verhältnisse von Methan zu HC im Zyklus CADC

Auch das Methan/HC-Verhältnis variiert deutlich zwischen 1 - 15 Massen-% für die einzelnen Zweiräder und Zyklusphasen. Auffallend hoch ist der Methan/HC-Anteil (10 - 15 %) im Abgas von Fahrzeug 10, einem 4-Takter mit Katalysator. Ebenfalls erhöht waren die Benzol/HC-Anteile dieses Fahrzeugs. Eine Erhöhung sowohl des Benzol/HC- wie auch des Methan/HC-Verhältnisses wurde ebenfalls bei der Einführung der katalytischen Abgasnachbehandlung für benzinbetriebene Personenwagen beobachtet. Die Fahrzeuge 3 und 7 haben im Stadtverkehr (Bag 1) sehr tiefe Methan/HC-Anteile, wobei für Fahrzeug 7 mit höherer Geschwindigkeit (Bag 2 und 3) der Methan/HC-Anteil deutlich ansteigt auf Werte, die mit den andern 4-Taktern vergleichbar sind.

3.5.2 Methanemissionen in den Zyklen SC und MC (kalt)

Die Methan-Emissionsfaktoren [mg/km] für die kalt gestarteten Zyklen SC und MC, sind in Abbildung 30 wiedergegeben. Abhängig vom Hubraum der Fahrzeuge wurden sie entweder im SC oder im MC getestet. Motorräder mit Hubraum bis 150 ccm wurden im Zyklus SC (innerorts), solche mit Hubraum >150 ccm wurden im Zyklus MC (ausserorts) gefahren.

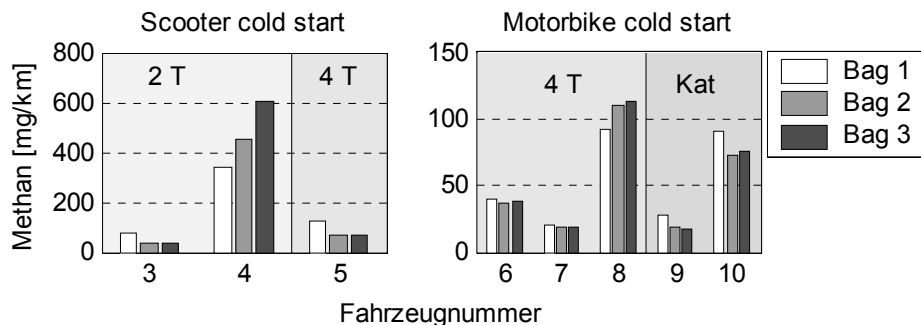


Abbildung 30: Methan-Emissionen in den Zyklen SC und MC

Auch in den Zyklen SC und MC unterscheiden sich die Methanemissionen der einzelnen Fahrzeuge deutlich. Fahrzeuge 3, 5, 6, 7, 9 und 10 zeigen erhöhte Methanemissionen

unter Kaltstart-Einfluss (Bag 1). Dagegen zeigen die Motorräder 4 und 8 den höchsten Methanausstoss im letzten Teilzyklus (Bag 3) und somit keinen Kaltstart-Einfluss.

Abbildung 31 zeigt die Methan/HC-Anteile im Abgas der untersuchten 2-Takt-, 4-Takt- und 4-Takt-Kat.-Fahrzeuge in den Zyklen SC resp. MC.

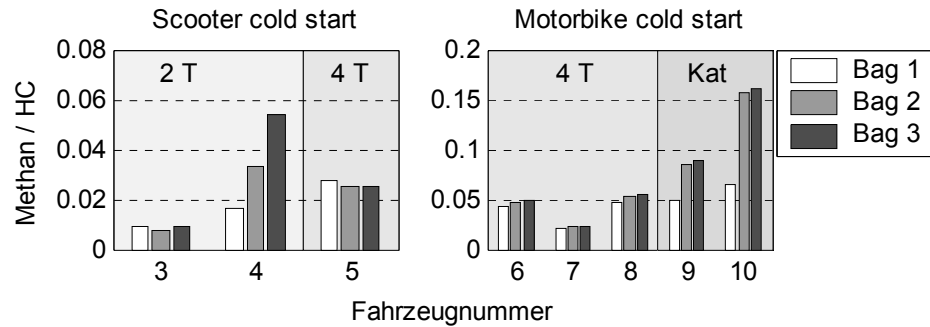


Abbildung 31: Verhältnisse von Methan zu HC in den Zyklen SC und MC

Vergleichbar mit den Ergebnissen des CADC variieren auch in den Zyklen SC und MC die Methan/HC-Verhältnisse im Bereich von 1 - 16 Massen-% stark. Wie schon im CADC sind auch im MC die Methan/HC-Anteile der 4-Takter mit Katalysator erhöht. Vor allem im Abgas der zweiten und dritten Phase mit warmem Motor und Katalysator sind Methan/HC-Anteile von 8 - 16 % nachweisbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auch bei Motorrädern die Einführung der Kat.-Technologie zu einer Erhöhung der Methan/HC- bzw. der Benzol/HC-Verhältnisse führt.

In Abbildung 32 sind die Methanemissionen [mg/Start], die dem Kaltstart zugeschrieben werden, dargestellt. Die Kaltstartzuschläge der Fahrzeuge 4 und 9 wurden nach Gleichung (2), die Zuschläge der übrigen Fahrzeuge nach Gleichung (1) berechnet.

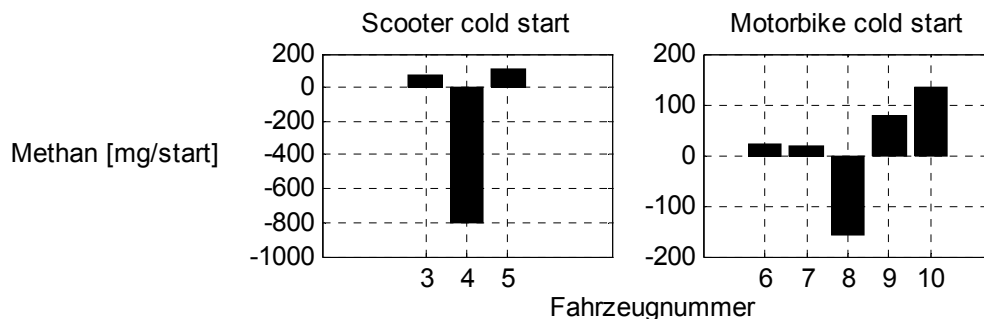


Abbildung 32: Kaltstartzuschläge von Methan in den Zyklen SC und MC

Für die Fahrzeuge 3, 5, 6, 7, 9 und 10 werden positive Kaltstartzuschläge abgeleitet. Unerwartet sind hingegen die negativen Zuschläge der Motorräder 4 und 8. Die Charakte-

istik der Methanemission von Fahrzeug 8 ist vergleichbar mit jener für andere Kohlenwasserstoffe. Der negative Kaltstartzuschlag von Fahrzeug 4 ist nicht verständlich. Bisher wurden keine negativen Methan-Kaltstartzuschläge beobachtet, weder für benzinbetriebene Personenwagen mit Katalysator (Euro-1, -2, -3) noch für Fahrzeuge ohne Katalysator (Euro-0). Es ist daher nicht klar, wie die Methan-Kaltstartzuschläge dieser beiden Fahrzeuge zu gewichten sind.

3.6 Partikel

Entstehung

Partikel bestehen grösstenteils aus festem kohlenstoffhaltigen Material (Russ), können aber auch flüchtige Verbindungen (Wasser, Schwefelsäure und organische Stoffe wie z.B. 2-Takt-Öl) enthalten [15]. Russ entsteht während der Verbrennung in Bereichen mit lokal fettem Gemisch. Der grösste Teil des im Brennraum gebildeten Russes oxidiert noch während der Verbrennung, der Rest wird mit dem Abgas ausgestossen. Ebenso entgeht ein Teil des Brennstoffs und des Schmieröls der Verbrennung und erscheint als Tröpfchen oder Ablagerungen auf dem Russ.

Charakteristisch für den Partikel ausstoss aus Verbrennungsmotoren ist der relativ hohe Russanteil und die fast ausschliessliche Emission von kleinen lungengängigen Partikeln, deren kanzerogene Eigenschaften in mehreren Studien nachgewiesen wurden [16]. Daneben bildet das bei Zweitaktmotoren im Brennstoff enthaltene Schmieröl Tröpfchen, die zu den flüchtigen Partikeln gezählt werden.

Messverfahren

Die Partikel wurden mit einem sog. Condensation Particle Counter (CPC) gemessen. Der CPC (Hersteller: TSI Inc., USA) zählt die einfallenden Partikel mittels einer optischen Detektion (Laser-Diode). Vor der Messung werden die Partikel durch ein übersättigtes Dampfbad geleitet, um sie durch Kondensation des Dampfes auf der Oberfläche zu vergrössern und dadurch messbar zu machen. Es können Konzentrationen von 0.007 Partikeln/cm³ bis $9.99 \cdot 10^6$ Partikeln/cm³ gemessen werden. Mit einer Ausleserate von 1 Sekunde ist der CPC in der Lage, transienten Zyklen zu folgen und die emittierten Partikel pro Zeiteinheit zu messen. Die Genauigkeit wird vom Hersteller mit +/-10 % für Konzentrationen bis $5 \cdot 10^5$ Partikeln/cm³ und mit +/-20 % für höhere Konzentrationen angegeben.

Zur Unterscheidung von festen und flüchtigen Partikelbestandteilen wurde dem CPC zunächst ein Thermodesorber (TD) vorangestellt. Er besteht aus einem temperaturgeregelten Heizrohr und einer wassergekühlten Aktivkohlefalle. In Abhängigkeit der Temperatur werden flüchtige Komponenten wie z.B. Öl im Heizrohr verdampft. Öltröpfchen und auf Russpartikel angelagerte unverbrannte Kohlenwasserstoffe werden absorbiert, so dass die Partikel nur noch aus Russ bestehen.

Das Abgas einiger Zweiräder enthielt teilweise sehr hohe Konzentrationen flüchtiger Partikel, wodurch der TD in Sättigung geriet und das vom CPC gelieferte Signal eine schlechte Qualität aufwies. Deshalb konnten nur Partikelmessungen **ohne** Thermode-

sorber analysiert werden, d.h. die Partikel enthalten sowohl Russ als auch Öl. Vor allem bei den Zweitaktern werden aus diesem Grund hohe Emissionen von Partikeln erwartet.

3.6.1 Messergebnisse

In den folgenden Diagrammen werden die Partikel aller vermessenen Zyklen dargestellt. Die Partikel werden pro Bag in Anzahl/km angegeben. Weil die Werte untereinander teilweise grosse Differenzen aufwiesen und eine graphische Darstellung mit linearer Ordinatenachse wenig sinnvoll erschien, wurden sie zur Basis 10 logarithmiert.

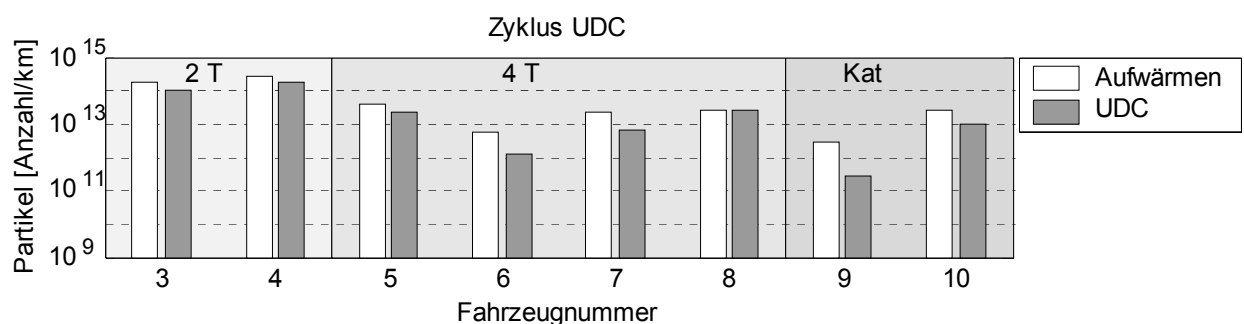


Abbildung 33: Partikelausstoss des UDC

Legislativer Zyklus

Die Zweitakter haben wie erwartet den grössten Partikelausstoss, wobei ein grosser Teil vermutlich unverbranntes Schmieröl ist, das Tröpfchen gebildet hat. Bei den meisten Fahrzeugen werden in der Aufwärmphase mehr Partikel pro Kilometer ausgestossen als während der Prüfphase. Die entsprechende Diskussion wird anhand der kalten realen Zyklen etwas später durchgeführt.

Warme reale Zyklen

Die Partikelmessungen fanden an beinahe allen Fahrzeugen in den gleichen Zyklen wie die Messungen der limitierten Schadstoffe statt. Einzig an Fahrzeug 6 wurden im Zyklus WMTC keine Partikel gemessen.

Wie bei den legislativen fallen auch bei den realen Zyklen die Zweitakter auf. Tendenziell lässt sich bei allen Fahrzeugen mit steigender Geschwindigkeit eine Zunahme des Partikelausstosses feststellen. Während bei den limitierten Schadstoffen in vergleichbaren Abschnitten etwa gleiche Emissionen resultierten, variiert die Zahl ausgestossener Partikel für ein Fahrzeug in vergleichbaren Abschnitten verschiedener Zyklen teilweise deutlich, wie beispielsweise die Messungen des Fahrzeugs 6 zeigen.

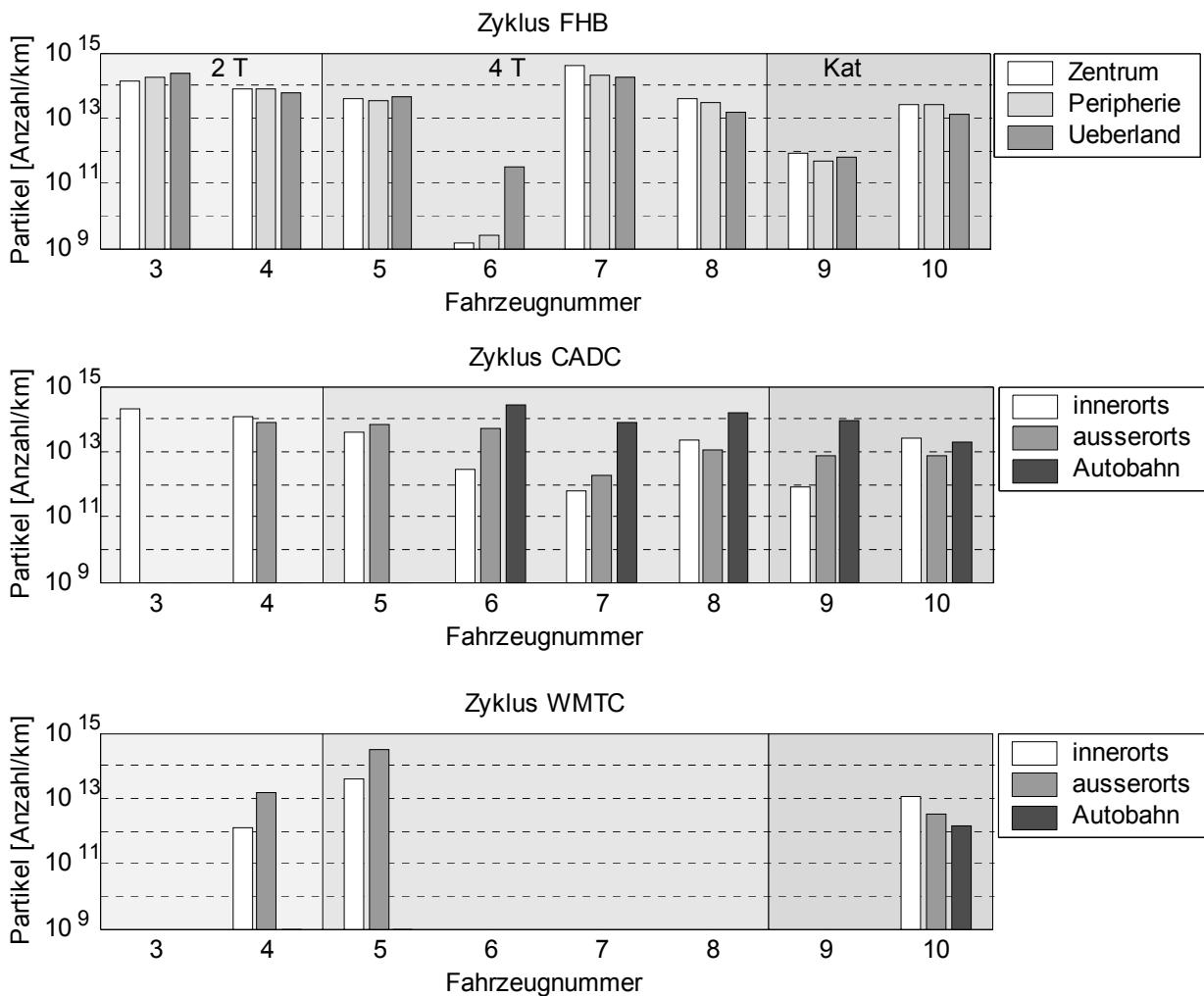


Abbildung 34: Partikel ausstoss der warmen realen Zyklen

Kalte reale Zyklen

Wie bei den limitierten Schadstoffen wurde auch für die Partikel das Kaltstartverhalten analysiert. Die folgenden Graphiken zeigen, dass die Fahrzeuge in kaltem Zustand auf den gefahrenen Kilometer gerechnet teilweise deutlich höhere Partikelemissionen haben als mit betriebswarmem Motor.

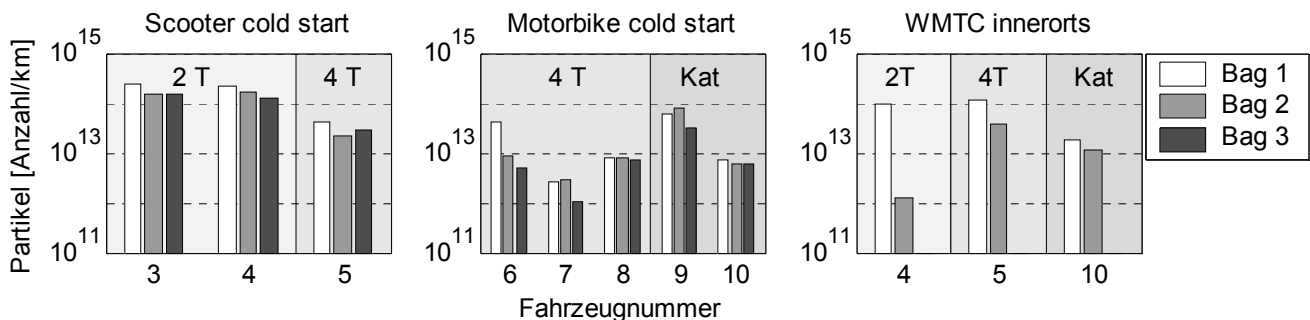


Abbildung 35: Partikel ausstoss der kalten Zyklen

Aus der höheren Emission mit kaltem im Vergleich zum warmen Motor resultieren für jedes Fahrzeug in jedem Zyklus positive Kaltstartzuschläge, wie in Abbildung 36 dargestellt. Der Kaltstartzuschlag wurde für die Fahrzeuge 4 und 9 nach Gleichung (2), für die Fahrzeuge 3, 5 bis 8 und 10 nach Gleichung (1) berechnet.

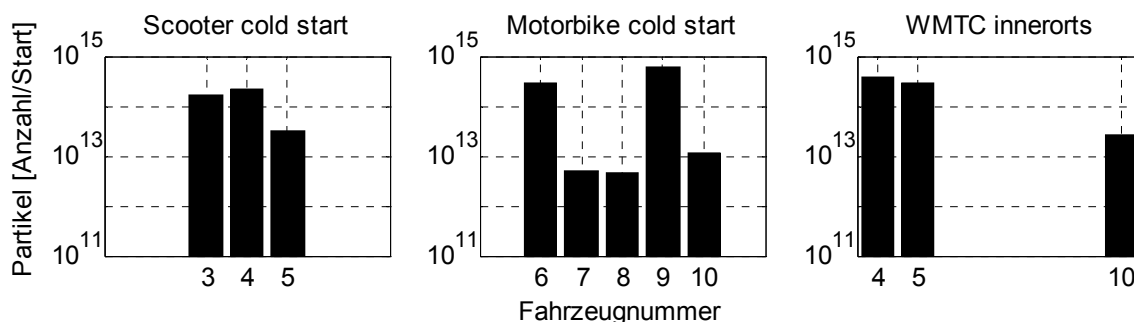


Abbildung 36: Partikel-Kaltstartzuschläge

Vergleich Sommer- und Winterkaltstart

Wie im Sommer- ist der Kaltstartzuschlag auch im Winter positiv. Während Fahrzeug 6 im Sommer einen grösseren Zuschlag hat als im Winter, ist diese Beziehung bei Fahrzeug 7 für die Phasen 2 und 3 umgekehrt. Die Kaltstartzuschläge wurden für beide Fahrzeuge nach Gleichung (1) berechnet.

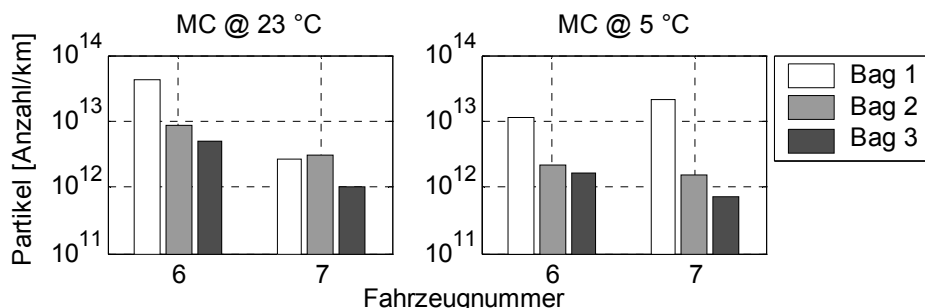


Abbildung 37: Partikel ausstoss der Fahrzeuge 6 und 7 in Sommer- und Winterkaltstart

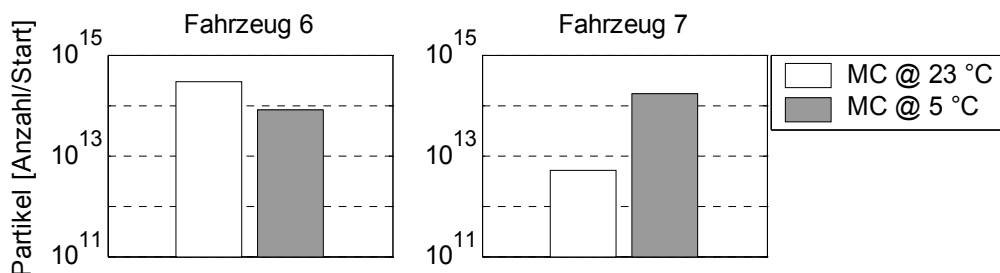


Abbildung 38: Partikel-Kaltstartzuschläge der Fahrzeuge 6 und 7

Abschliessend muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die hier angegebenen Partikelzahlen nicht direkt mit Werten von Dieselfahrzeugen verglichen werden

können. Die Partikel der Motorräder bestehen zu einem viel grösseren Anteil aus flüchtigen Teilen, als es beim Dieselabgas der Fall ist [1]!

3.7 Ozonbildungspotential

3.7.1 Ozonbildungspotential und spezifische Reaktivität

Durch photochemische Reaktionen der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und der Stickoxide (NO_x) werden im Sonnenlicht sekundäre Luftschadstoffe gebildet, wobei Ozon die Hauptkomponente darstellt. Die VOC-Emission von Benzinmotoren besteht vorwiegend aus ungesättigten kurzkettigen Kohlenwasserstoffen (Ethen, Propen), teiloxidierten Kohlenwasserstoffen (Formaldehyd, Acetaldehyd) und unverbranntem Treibstoff.

Die einzelnen VOCs tragen höchst unterschiedlich zur Ozonbildung bei. Den in diesem Bericht angegebenen *Ozonbildungspotentialen* liegen die „Maximum Incremental Reactivities“ (MIR) des kalifornischen Abgasreglements zugrunde (California Air Resources Board (CARB), 2002). Die MIR-Werte geben an, wie viel Gramm Ozon aus einem Gramm der VOC-Spezies unter Idealbedingungen gebildet werden könnte. Die Ozonbildungspotentiale der VOC im Abgas bewegen sich zwischen 0 - 16 g Ozon/g VOC. Das Ozonbildungspotential eines Abgases wird durch Aufsummierung der Einzelwerte berechnet. Dies bedingt die quantitative Bestimmung von ca. 180 Zielkomponenten im Abgas. Die vollständigen Ergebnisse der VOC-Analysen befinden sich im Anhang.

Die ebenfalls im Bericht aufgeführten *spezifischen Reaktivitäten* der Abgase, definiert als Gramm potentiell Ozon pro Gramm NMOG-Emission (NMOG: Non-methane Organic Gases), widerspiegeln die unterschiedlichen Abgaszusammensetzungen in Abhängigkeit von Motorkonzept, Kraftstoff, Abgasnachbehandlung und Fahrweise. Die spezifische Reaktivität ist der Gewichtungsfaktor, wenn verschiedene Emissionsquellen über ihren Gesamt-VOC-Ausstoss bezüglich der Auswirkung auf die Ozonbildung verglichen werden sollen.

Das Ozonbildungspotential wurde für sechs Motorräder im CADC-Zyklus bestimmt. Bei den Scootern (Fahrzeuge 4 und 5) liessen die Höchstgeschwindigkeiten keine Autobahnfahrt zu. Stattdessen wurde der erste Teile des Zyklus Scooter cold start mitgemessen. Beim Kleinmotorrad (Fahrzeug 3) wurde anstelle der Ausserortsfahrt auch der dritte Teil des SC-Zyklus ins Programm aufgenommen.

3.7.2 Messverfahren

Die Kohlenwasserstoffe wurden gaschromatographisch mit Flammenionisationsdetektion (GC-FID) bestimmt. Für die leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe ($\text{C}_2 - \text{C}_5$) und die schwerer flüchtigen Kohlenwasserstoffe ($\text{C}_6 - \text{C}_{12}$) kamen unterschiedliche GC-Systeme zur Anwendung.

Zur Bestimmung der Aldehyde und Ketone wurde das Abgas durch eine Lösung von 2,4-Dinitrophenylhydrazin in Acetonitril geleitet. Die gebildeten 2,4-Dinitrophenylhydrazon-Derivate wurden mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC) mit UV-Detektion quantifiziert.

3.7.3 Messergebnisse

Potentielle Ozonemission

Die potentiellen Ozon-Emissionen der untersuchten Motorräder sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt. Die Emissionen bewegen sich zwischen 16 und 48 g Ozon/km bei den Zweitaktfahrzeugen mit Oxidationskatalysator, 4.5 - 16.5 g/km bei den Viertaktfahrzeugen ohne Katalysator und 0.5 - 4.5 g/km bei den Motorrädern mit geregelttem 3-Wege-Katalysator. Der Spitzenwert wird vom Zweitakt-Scooter (Fahrzeug 4) beim Kaltstart-Zyklus (Scooter cold start, 23 °C) mit 66 g Ozon/km erreicht. Bei allen Motorrädern stammen die Hauptbeiträge zum Ozonbildungspotential des Abgases von den aromatischen Treibstoffkomponenten Toluol und Xylol und den motorischen Verbrennungsprodukten Ethen und Propen.

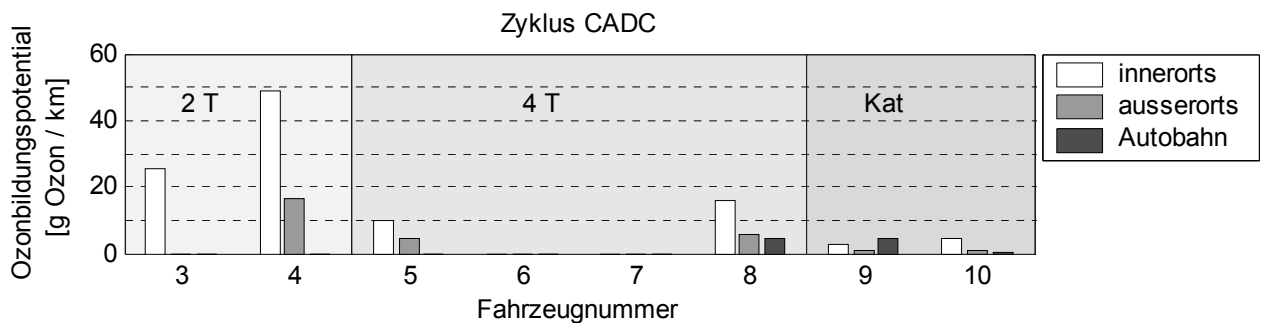


Abbildung 39: Potentielle Ozonemission im Zyklus CADC

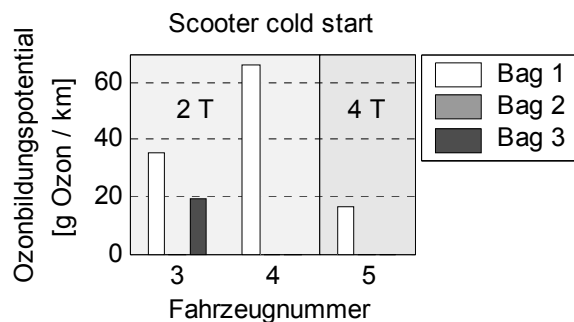


Abbildung 40: Potentielle Ozonemission im Zyklus Scooter cold start

Spezifische Reaktivität des Abgases

Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen die spezifischen Reaktivitäten in den Zyklen CADC resp. SC. Die Werte liegen zwischen 4 – 5 g Ozon/g NMOG. Eine Ausnahme bildet einzig Fahrzeug 10 mit tieferen Werten im Innerorts- und Ausserorts-Zyklus. Die Reaktivitäten des Abgases nehmen (wiederum mit Ausnahme von Fahrzeug 10 ausserorts) mit zunehmender Durchschnittsgeschwindigkeit des Zyklus zu. Die Zunahmen betragen 3 – 8 % von innerorts zu ausserorts und 13 – 24 % von innerorts zu Autobahn. Beim Kleinmotorrad (Fahrzeug 3) ist im SC zwischen dem ersten Teil des Zyklus mit kaltem Motor (Bag 1) und dem dritten Teil mit warmem Motor (Bag 3) kein signifikanter Unterschied der spezifischen Reaktivitäten feststellbar.

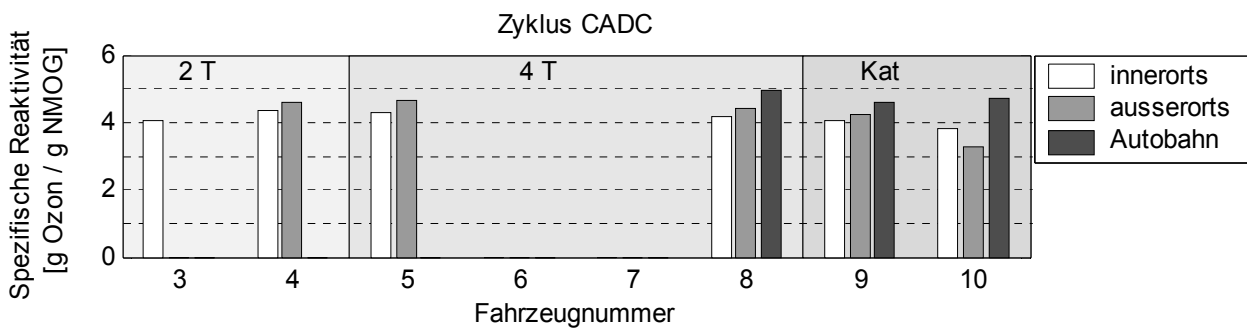


Abbildung 41: Spezifische Reaktivitäten des Abgases im Zyklus CADC

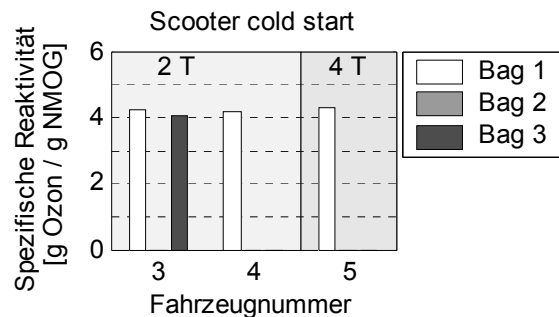


Abbildung 42: Spezifische Reaktivitäten des Abgases im Zyklus Scooter cold start

4 Anhang

4.1 Treibstoffanalyse

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
 Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
 Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca
 Institut federal da controlla da material e da retschertgas
 Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

EMPA
 Überlandstrasse 129
 CH-8600 Dübendorf
 Tel. +41-1-823 55 11
 Fax +41-1-821 62 44



Prüfbericht Nr.: 416064/08

Auftraggeber:

EMPA
 Abteilung 137
 Überlandstrasse 129
 8600 Dübendorf

Prüfobjekt: BENZIN
 Eingangsdatum: 2001-03-05
 Verpackung: 2 Kannen
 Tank Nr.: 34
 Ihr Auftrag vom: 2001-03-12
 Sachbearbeiter: D. Steffen
 Spezifikation: CEC RF-08-A-85
 Probenbezeichnung: BABHE-2000

Analyse	Einheit	Resultat	Limiten		Prüfmethode
			Tief	Hoch	
Dichte bei 15 °C	kg/m ³	753.2	748	762	ASTM D 4052
Siedeanalyse (101,3 kPa)					ISO 3405
Siedebeginn	°C	31	24	40	
10 Vol.% verdampft bis	°C	49	42	58	
20 Vol.% verdampft bis	°C	57			
50 Vol.% verdampft bis	°C	97	90	110	
90 Vol.% verdampft bis	°C	(!) 154	155	180	
Siedeende	°C	194	190	215	
Rückstand	Vol.%	1.0		2	
Siedeverlust	Vol.%	1.0			
bis 70 °C verdampft	Vol.%	32			
bis 100 °C verdampft	Vol.%	51.6			
bis 150 °C verdampft	Vol.%	88.3			
Abdampfrückstand					EN 26246
Abdampfrückstand	mg/100 mL	14			
nach n-Heptanbehandlung	mg/100 mL	2			
Kupferkorrosion	Korr.grad	1		1	ASTM D 130
Sauerstoffverbindungen					ASTM D 4815
Methanol	Vol.%	<0.1			
Ethanol	Vol.%	<0.1			
2-Propanol (IPA)	Vol.%	<0.1			
2-Methyl-1-propanol (IBA)	Vol.%	<0.1			
2-Methyl-2-propanol (TBA)	Vol.%	<0.1			
Ether (5 oder mehr C-Atome)	Vol.%	1.3			
andere sauerstoffhalt. org. Verbindungen	Vol.%	<0.1			
Benzol	Vol.%	(!) 3.0		1	EN 238
Olefine	Vol.%	5.2		20	ASTM D 1319
Aromaten	Vol.%	39.4			ASTM D 1319
Motor-Oktanzahl (MOZ)		85.1	85.0		ISO 5163
Research-Oktanzahl (ROZ)		95.3	95.0		ISO 5164
Aromaten (mono-, di-, tri-)					IP 391
Monoaromaten	Mass.%	37.3			
Diaromaten	Mass.%	0.5			
Tri- und Tetraaromaten	Mass.%	<0.1			

Bemerkung:
 Die mit (!) gekennzeichneten Analysenpunkte liegen ausserhalb der geforderten Spezifikation.

Dübendorf, 26. März 2001

Abteilung Betriebsstoffe

Der Prüfleiter:

Der Abteilungsleiter:

U. Debrunner

H. W. Jäckle

U. Debrunner

Dr. H.W. Jäckle



STS-Nr. 033
 Oktober 1999

Anmerkung: Die Untersuchungsergebnisse haben nur Gültigkeit für das geprüfte Objekt.
 Das Verwenden des Berichtes zu Werbezwecken, der blosser Hinweis darauf sowie auszugsweises Veröffentlichungen bedürfen der Genehmigung der EMPA (vgl. Merkblatt).
 Berichte und Rohdaten werden 10 Jahre archiviert. Die Prüfobjekte sind bis mind. 1 Monat nach Berichtsdatum in Abt.133.
 Einzelheiten zu den Untersuchungsverfahren können bei der Abt.133 erfragt werden.

SID:200035072/TRID:80022772/LPV:2.62/UD133

4.2 Messprinzipien

4.2.1 Messung von NO_x

Für die Messung wird mit einem thermischen Konverter das im Messgas enthaltene NO₂ zu NO reduziert. Anschliessend wird alles NO mit Hilfe von Ozon zu NO₂ oxidiert. Dabei werden Photonen freigesetzt, deren Strom proportional zur NO-Konzentration ist. Das für die Messung von NO_x verwendete Gerät ist ein sog. Chemiluminisenz-Analysator (CLD).

4.2.2 Messung von HC

Das HC-Messprinzip beruht darauf, dass in einer Wasserstoffflamme aus eintretenden Kohlenwasserstoffmolekülen Ionen gebildet werden. Die Flamme brennt zwischen zwei an Gleichspannung liegenden Elektroden, und der entstehende Ionenstrom ist direkt proportional zum Kohlenstoffgehalt. Der Analysator wird als Flammenionisationsdetektor (FID) bezeichnet.

4.2.3 Messung von CO

Das Messgas sowie ein Referenzgas werden in Messküvetten vor einer Empfängerammer durchgeleitet. Ein Infrarotstrahler durchstrahlt diese Messküvetten. Das Messgas absorbiert einen von der CO-Konzentration abhängigen Anteil der Infrarotstrahlung, das Referenzgas absorbiert keine Strahlung. In der Empfängerammer dient die Differenz der ankommenden Infrarotleistung als Mass der CO-Konzentration. Der Analysator wird als nicht-dispersiver Infrarot-Analysator bezeichnet (NDIR).

4.2.4 Messung von CO₂

Kohlendioxyd-Emissionen werden, analog zum Messprinzip der CO-Emissionen, mit NDIR-Analysatoren gemessen.

4.2.5 Messung mit Chemischer Ionisations Massenspektrometrie (CI-MS)

Die folgende Skizze beschreibt das Prinzip des verwendeten Massenspektrometers mit Chemischer Ionisation (CI-MS).

Es werden in der Ionenquelle (Filament) Elektronen abgegeben, welche ein Primärgas ionisieren. Fest installiert sind ein Quecksilberreservoir und je eine Xenon- und Krypton-druckflasche. Das ionisierte Gas (bei diesen Messungen Quecksilber und Xenon) wird in einem ersten Oktopol-Stabsystem gebündelt. Anschliessend wird der Ionenstrahl durch eine erste Blende geschickt, in einem weiteren, gekrümmten Oktopol nochmals fokussiert und trifft dann in der Mischkammer auf das Abgas, wo die Primär-

gasionen mit den Abgasmolekülen reagieren. Durch Ladungsübertragungsreaktionen (Hg^+ : 10.4 eV, Xe^+ : 12.1 eV) werden die Abgasmoleküle ionisiert. Danach wird der Ionenstrahl nochmals durch eine Blende geschickt. Im Quadrupol werden die unerwünschten Massen ausgesondert. Dieser „gereinigte“ Ionenstrahl trifft auf den Detektor, welcher beim Auftreten der Ionen proportionale elektrische Impulse generiert. Diese Impulse werden durch die Datenauswertung in Messdaten umgewandelt und auf dem Computer gespeichert.

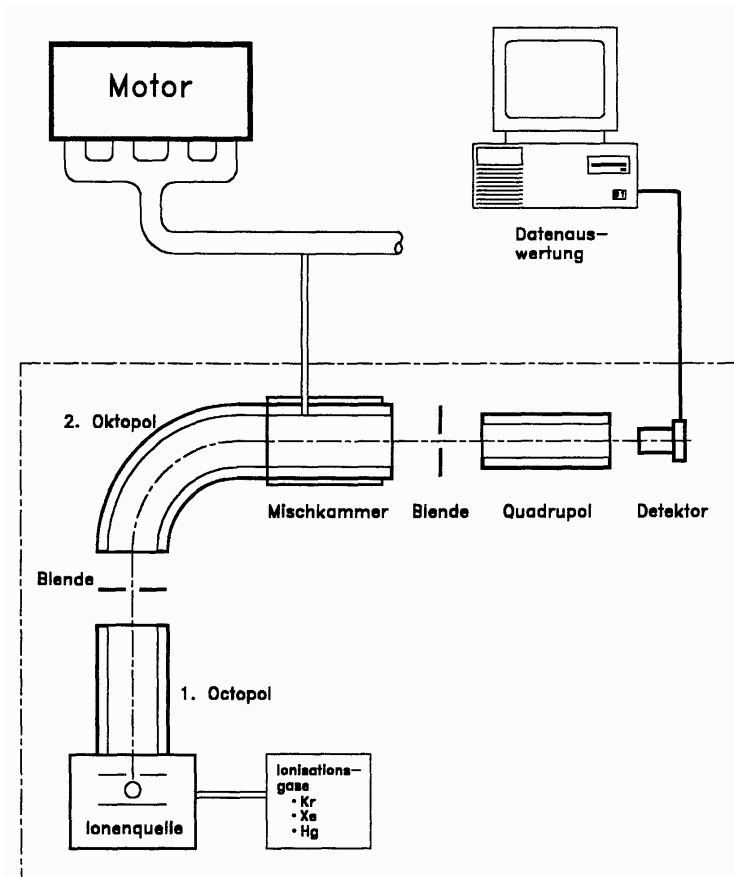


Abbildung 43: Darstellung des Chemischen Ionisations-Massenspektrometers (CI-MS) inklusive Probegaseinspeisung vom Fahrzeug

4.3 Prüfzyklus UDC

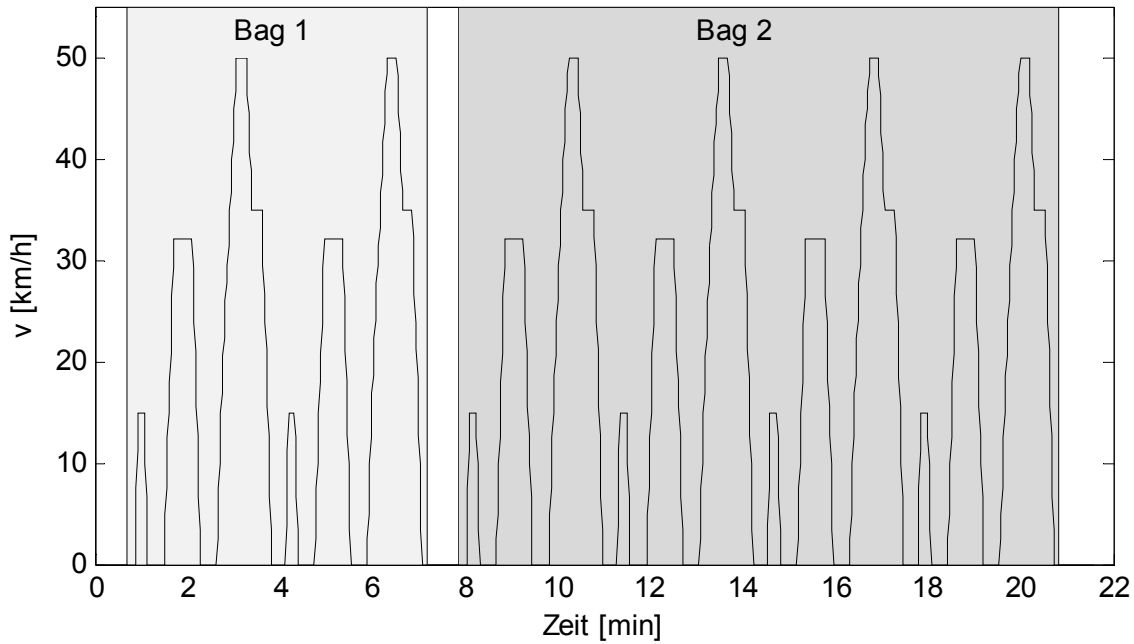


Abbildung 44: Zeitverlauf des Zyklus UDC

4.4 Prüfzyklus FHB

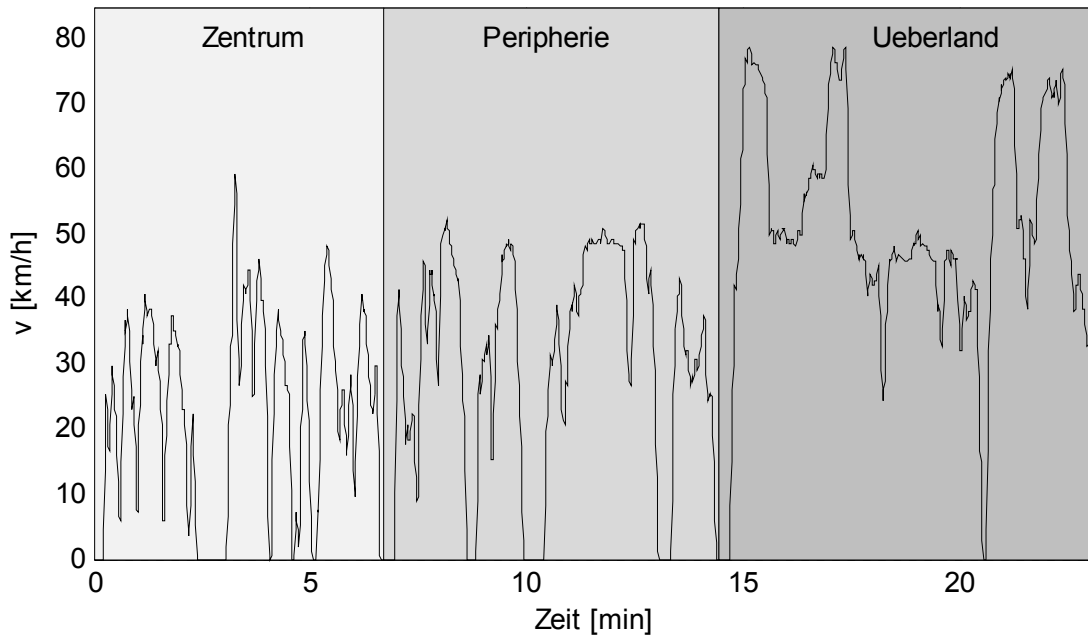


Abbildung 45: Zeitverlauf des Zyklus FHB

4.5 Prüfzyklus CADC

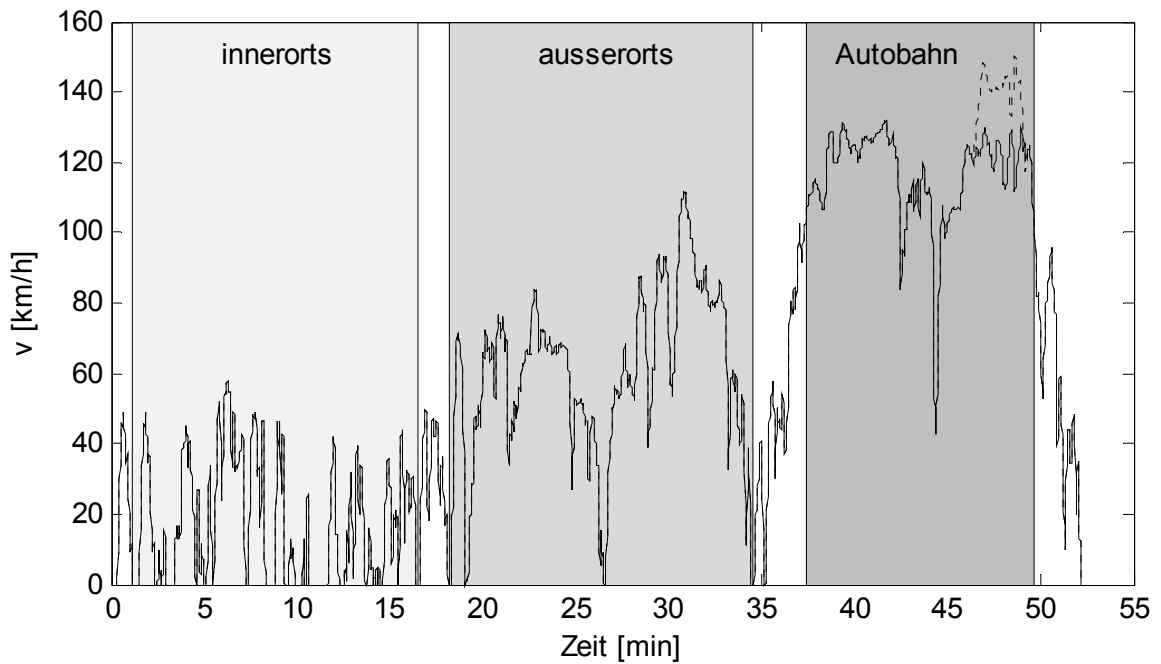


Abbildung 46: Zeitverlauf des Zyklus CADC

4.6 Prüfzyklus WMTC

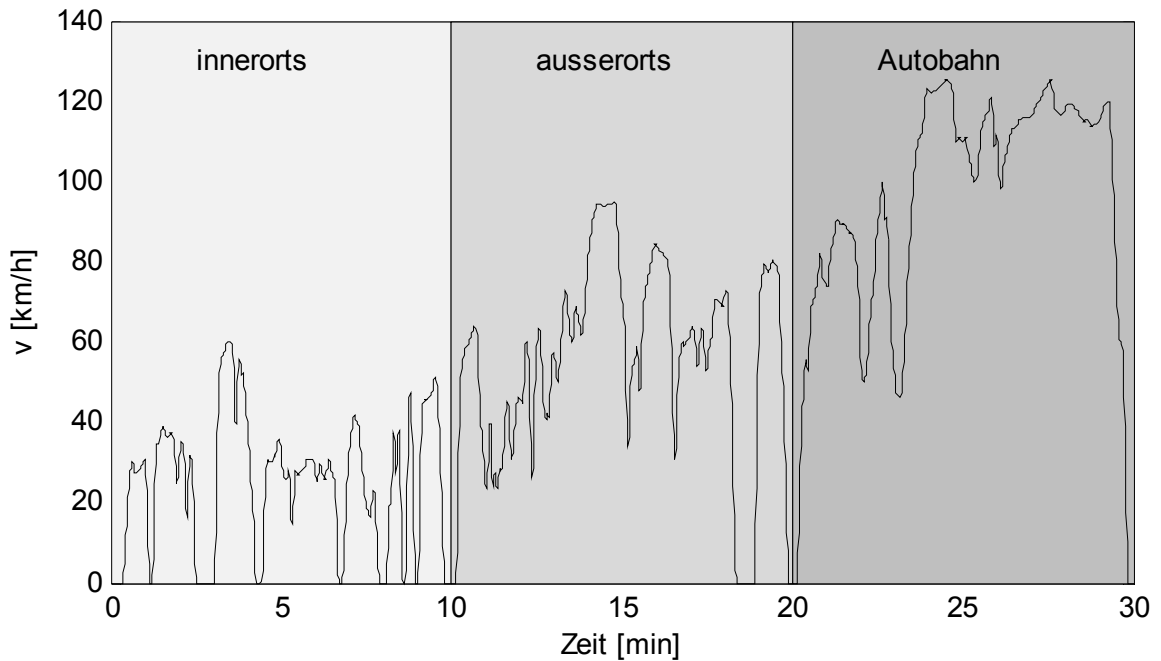


Abbildung 47: Zeitverlauf des Zyklus WMTC

4.7 Prüfzyklus Scooter cold start

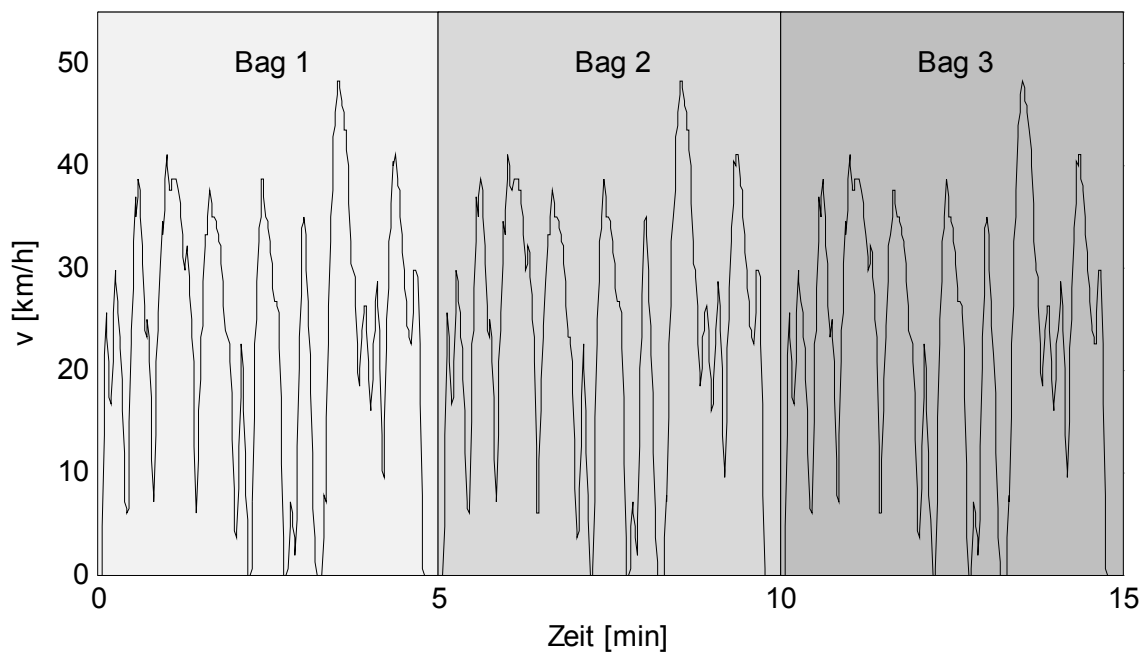


Abbildung 48: Zeitverlauf des Zyklus Scooter cold start

4.8 Prüfzyklus Motorbike cold start

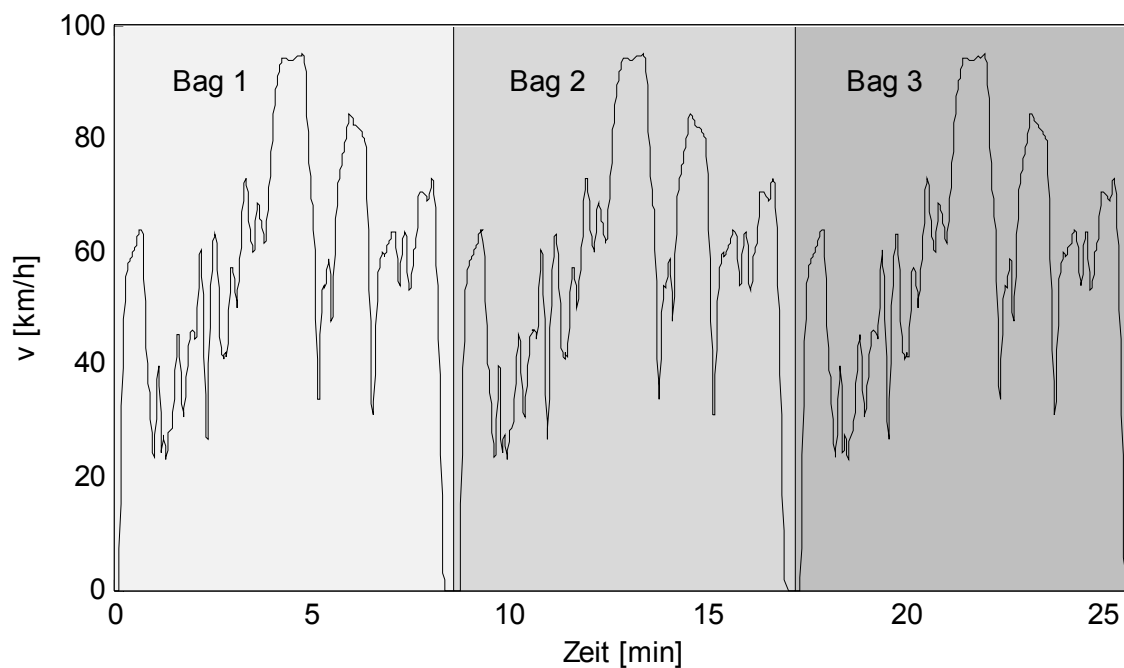


Abbildung 49: Zeitverlauf des Zyklus Motorbike cold start

4.9 Bagwerte

		Bagwerte CO [g/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	6.0	37.3	25.7	15.6	15.1	50.5	11.0	38.1
	4 ECE	3.5	39.8	19.1	16.8	2.5	57.0	2.0	19.0
MC @ 23°C	Bag 1				14.8	11.2	21.2	3.1	14.4
	Bag 2				14.8	10.8	23.4	1.5	11.0
	Bag 3				15.0	11.3	23.4	1.3	11.6
MC @ 5°C	Bag 1				8.5	5.8			
	Bag 2				10.6	5.1			
	Bag 3				12.8	5.4			
SC	Bag 1	7.5	34.2	24.2					
	Bag 2	5.2	36.9	17.0					
	Bag 3	6.0	37.0	17.4					
FHB	Zentrum	5.7	40.6	17.0	16.1	5.1	45.9	2.0	20.4
	Peripherie	6.2	30.8	14.7	13.8	5.1	38.6	0.9	22.5
	Überland	8.3	23.9	13.1	12.9	7.8	25.2	0.7	13.3
CADC	innerorts	8.1	42.1	20.8	19.4	6.6	54.7	2.0	23.7
	ausserorts		25.6	17.4	15.3	12.7	25.2	0.8	10.7
	Autobahn 130						44.7	19.1	2.0
	Autobahn 150				20.7	35.1			
WMTC	innerorts,kalt		36.2	21.1	15.2				28.9
	ausserorts		27.0	16.3	15.3				7.4
	Autobahn				18.8				2.9
	innerorts,warm		34.6	18.5	16.3				19.6

Tabelle 11: Bagwerte CO

		Bagwerte HC [g/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	6.520	22.32	2.835	1.247	1.880	4.203	3.990	4.776
	4 ECE	3.151	13.58	1.790	1.078	1.409	4.208	0.757	1.043
MC @ 23°C	Bag 1				0.905	0.979	2.001	0.568	1.380
	Bag 2				0.772	0.804	2.034	0.217	0.462
	Bag 3				0.763	0.800	2.072	0.199	0.471
MC @ 5°C	Bag 1				0.926	0.943			
	Bag 2				0.606	0.695			
	Bag 3				0.623	0.708			
SC	Bag 1	7.829	20.44	4.458					
	Bag 2	4.378	13.43	2.645					
	Bag 3	4.424	11.21	2.616					
FHB	Zentrum	4.420	9.93	2.563	1.429	1.783	3.840	0.989	1.630
	Peripherie	4.019	8.53	1.705	0.957	1.183	3.216	0.473	1.087
	Überland	4.492	5.42	1.296	0.780	0.803	1.977	0.336	0.475
CADC	innerorts	5.723	12.62	2.395	1.415	1.637	4.245	0.779	1.338
	ausserorts		4.47	1.168	0.665	0.657	1.573	0.285	0.401
	Autobahn 130						1.117	1.074	0.130
	Autobahn 150				0.537	0.659			
WMTC	innerorts,kalt		15.22	19.48	1.114				2.829
	ausserorts		4.95	4.158	0.813				0.451
	Autobahn				0.612				0.170
	innerorts,warm		11.27	2.102	0.968				1.549

Tabelle 12: Bagwerte HC

Bagwerte NO _x (NO ₂ -äquivalent) [g/km]									
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	0.047	0.008	0.077	0.195	0.226	0.109	0.131	0.127
	4 ECE	0.045	0.006	0.080	0.133	0.269	0.082	0.033	0.053
MC @ 23°C	Bag 1				0.269	0.478	0.274	0.167	0.128
	Bag 2				0.231	0.439	0.233	0.135	0.068
	Bag 3				0.222	0.427	0.230	0.135	0.067
MC @ 5°C	Bag 1				0.407	0.512			
	Bag 2				0.304	0.579			
	Bag 3				0.255	0.561			
SC	Bag 1	0.066	0.012	0.123					
	Bag 2	0.083	0.006	0.140					
	Bag 3	0.081	0.006	0.138					
FHB	Zentrum	0.076	0.005	0.167	0.264	0.413	0.133	0.058	0.058
	Peripherie	0.054	0.004	0.145	0.179	0.306	0.106	0.076	0.049
	Überland	0.043	0.004	0.212	0.207	0.361	0.170	0.153	0.053
CADC	innerorts	0.076	0.007	0.152	0.276	0.414	0.141	0.073	0.042
	ausserorts		0.008	0.217	0.224	0.404	0.222	0.246	0.113
	Autobahn 130						0.331	0.242	0.848
	Autobahn 150				0.459	0.680			
WMTC	innerorts,kalt		0.006	0.101	0.219				0.133
	ausserorts		0.006	0.210	0.239				0.088
	Autobahn				0.423				0.487
	innerorts,warm		0.005	0.104	0.197				0.063

 Tabelle 13: Bagwerte NO_x (NO₂-äquivalent)

Bagwerte NO [g/km]									
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	0.031	0.005	0.050	0.121	0.122	0.071	0.080	0.083
	4 ECE	0.029	0.004	0.052	0.085	0.143	0.054	0.020	0.035
MC @ 23°C	Bag 1				0.135	0.171	0.140	0.090	0.074
	Bag 2				0.125	0.178	0.131	0.080	0.043
	Bag 3				0.127	0.189	0.137	0.082	0.043
MC @ 5°C	Bag 1				0.166	0.219			
	Bag 2				0.146	0.221			
	Bag 3				0.137	0.239			
SC	Bag 1	0.043	0.008	0.079					
	Bag 2	0.052	0.005	0.091					
	Bag 3	0.052	0.004	0.091					
FHB	Zentrum	0.046	0.004	0.101	0.152	0.211	0.085	0.037	0.038
	Peripherie	0.032	0.003	0.088	0.105	0.160	0.068	0.047	0.032
	Überland	0.024	0.002	0.121	0.116	0.177	0.103	0.088	0.034
CADC	innerorts	0.048	0.004	0.095	0.150	0.206	0.088	0.045	0.028
	ausserorts		0.005	0.122	0.105	0.163	0.121	0.117	0.067
	Autobahn 130						0.169	0.100	0.268
	Autobahn 150				0.160	0.183			
WMTC	innerorts,kalt		0.004	0.063	0.127				0.081
	ausserorts		0.003	0.113	0.131				0.055
	Autobahn				0.203				0.256
	innerorts,warm		0.004	0.067	0.127				0.041

Tabelle 14: Bagwerte NO

		Bagwerte NO ₂ [g/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	0.000	0.000	0.000	0.010	0.039	0.001	0.008	0.000
	4 ECE	0.001	-0.001	0.000	0.002	0.051	-0.001	0.002	0.000
MC @ 23°C	Bag 1				0.063	0.217	0.060	0.029	0.015
	Bag 2				0.040	0.166	0.033	0.013	0.003
	Bag 3				0.028	0.138	0.020	0.010	0.001
MC @ 5°C	Bag 1				0.152	0.178			
	Bag 2				0.080	0.241			
	Bag 3				0.045	0.195			
SC	Bag 1	0.001	-0.001	0.002					
	Bag 2	0.004	-0.001	0.001					
	Bag 3	0.002	-0.001	0.000					
FHB	Zentrum	0.006	0.000	0.011	0.031	0.091	0.004	0.002	0.000
	Peripherie	0.004	0.000	0.011	0.018	0.062	0.003	0.003	0.000
	Überland	0.005	0.001	0.027	0.029	0.090	0.013	0.019	0.000
CADC	innerorts	0.003	0.000	0.006	0.047	0.099	0.007	0.004	0.000
	ausserorts		0.000	0.029	0.064	0.155	0.037	0.067	0.011
	Autobahn 130						0.072	0.089	0.438
	Autobahn 150				0.214	0.400			
WMTC	innerorts,kalt		0.000	0.006	0.026				0.008
	ausserorts		0.001	0.037	0.038				0.004
	Autobahn				0.113				0.096
	innerorts,warm		0.000	0.002	0.004				0.000

 Tabelle 15: Bagwerte NO₂

		Bagwerte NO _{x,wahr} [g/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	0.031	0.005	0.050	0.131	0.162	0.071	0.088	0.083
	4 ECE	0.030	0.003	0.052	0.088	0.194	0.053	0.022	0.035
MC @ 23°C	Bag 1				0.198	0.387	0.200	0.119	0.089
	Bag 2				0.165	0.344	0.164	0.093	0.046
	Bag 3				0.155	0.327	0.157	0.092	0.044
MC @ 5°C	Bag 1				0.319	0.397			
	Bag 2				0.227	0.462			
	Bag 3				0.182	0.435			
SC	Bag 1	0.044	0.007	0.081					
	Bag 2	0.055	0.004	0.092					
	Bag 3	0.054	0.004	0.090					
FHB	Zentrum	0.051	0.003	0.113	0.183	0.302	0.089	0.038	0.038
	Peripherie	0.037	0.003	0.099	0.123	0.221	0.070	0.051	0.032
	Überland	0.030	0.003	0.148	0.145	0.267	0.116	0.107	0.035
CADC	innerorts	0.051	0.004	0.101	0.197	0.305	0.095	0.049	0.027
	ausserorts		0.005	0.152	0.169	0.318	0.158	0.184	0.077
	Autobahn 130						0.241	0.189	0.706
	Autobahn 150				0.374	0.583			
WMTC	innerorts,kalt		0.004	0.068	0.152				0.090
	ausserorts		0.004	0.150	0.170				0.059
	Autobahn				0.315				0.352
	innerorts,warm		0.003	0.069	0.130				0.041

 Tabelle 16: Bagwerte NO_{x,wahr}

		Bagwerte CO ₂ [g/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	42.0	54.1	42.4	72.3	105.6	115.6	163.9	152.8
	4 ECE	43.1	72.0	39.7	59.5	97.1	98.2	172.3	158.3
MC @ 23°C	Bag 1				48.2	71.6	76.1	131.3	120.0
	Bag 2				42.3	66.7	67.2	124.7	119.2
	Bag 3				41.8	65.4	65.6	123.8	116.0
MC @ 5°C	Bag 1				58.3	79.8			
	Bag 2				46.5	72.0			
	Bag 3				43.8	70.8			
SC	Bag 1	38.4	43.5	39.4					
	Bag 2	40.0	60.3	38.5					
	Bag 3	39.4	67.4	37.7					
FHB	Zentrum	41.1	68.3	39.2	55.7	91.1	92.2	164.2	149.4
	Peripherie	34.9	58.8	34.2	44.9	81.5	72.3	141.7	132.2
	Überland	33.5	46.1	35.6	39.6	67.5	60.3	119.3	112.5
CADC	innerorts	46.4	80.1	44.0	63.5	104.0	103.5	187.5	178.7
	ausserorts		45.8	39.8	42.3	66.7	64.4	116.6	112.5
	Autobahn 130						92.1	114.1	129.4
	Autobahn 150				70.0	93.8			
WMTC	innerorts,kalt		56.0	37.2	59.6				142.9
	ausserorts		47.7	39.1	42.8				110.2
	Autobahn				60.3				114.2
	innerorts,warm		64.1	34.2	50.3				133.7

 Tabelle 17: Bagwerte CO₂

4.10 Integralwerte

		Integralwerte CO [g/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	6.5	34.5	27.5	15.8	15.6	50.6	10.9	37.3
	4 ECE	3.9	37.6	20.6	17.0	2.7	56.7	2.1	18.9
MC @ 23°C	Bag 1				15.6	11.8	20.9	3.1	13.9
	Bag 2				15.8	11.6	23.1	1.6	10.9
	Bag 3				15.9	12.0	23.1	1.3	11.3
MC @ 5°C	Bag 1				9.0	6.1			
	Bag 2				11.3	5.4			
	Bag 3				13.6	5.7			
SC	Bag 1	8.1	29.8	26.1					
	Bag 2	5.8	33.3	18.4					
	Bag 3	6.4	34.3	18.7					
FHB	Zentrum	6.6	37.7	18.6	16.5	5.4	45.6	2.0	20.5
	Peripherie	7.1	29.0	16.2	14.1	5.4	38.4	0.9	22.3
	Überland	8.9	26.0	14.5	13.2	8.3	25.0	0.6	13.2
CADC	innerorts	8.6	39.0	22.4	20.3	6.9	54.2	1.9	23.5
	ausserorts		25.8	18.3	16.3	13.7	23.3	0.8	10.6
	Autobahn 130						44.0	20.7	2.0
	Autobahn 150				21.6	36.1			
WMTC	innerorts,kalt		32.5	19.9	16.2				28.4
	ausserorts		26.8	16.4	16.3				7.4
	Autobahn				21.7				2.9
	innerorts,warm		32.0	17.2	15.6				20.1

Tabelle 18: Integralwerte CO

Integralwerte HC [g/km]									
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	6.765	20.37	3.180	1.315	2.065	4.411	4.106	4.808
	4 ECE	3.375	12.39	2.011	1.100	1.529	4.401	0.790	1.094
MC @ 23°C	Bag 1				0.962	0.898	2.012	0.936	1.403
	Bag 2				0.805	0.721	2.048	0.361	0.475
	Bag 3				0.790	0.714	2.087	0.334	0.480
MC @ 5°C	Bag 1				0.992	1.045			
	Bag 2				0.642	0.752			
	Bag 3				0.658	0.764			
SC	Bag 1	8.230	18.50	4.711					
	Bag 2	4.638	12.25	2.971					
	Bag 3	4.624	10.46	2.930					
FHB	Zentrum	4.670	9.183	2.869	1.472	1.925	4.104	0.995	1.647
	Peripherie	4.272	7.918	1.914	0.962	1.225	3.230	0.479	1.130
	Überland	4.751	4.991	1.489	0.804	0.874	1.989	0.345	0.471
CADC	innerorts	5.678	11.70	2.666	1.456	1.651	4.165	0.415	1.379
	ausserorts		4.126	1.290	0.701	0.714	1.501	0.199	0.405
	Autobahn 130						1.095	1.042	0.130
	Autobahn 150				0.597	0.732			
WMTC	innerorts,kalt		14.02	19.27	1.139				2.888
	ausserorts		4.631	4.178	0.807				0.468
	Autobahn				0.612				0.170
	innerorts,warm		10.69	1.998	0.852				1.613

Tabelle 19: Integralwerte HC

Integralwerte NO _x [g/km]									
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	0.053	0.010	0.084	0.219	0.264	0.118	0.133	0.133
	4 ECE	0.052	0.007	0.089	0.145	0.295	0.088	0.033	0.055
MC @ 23°C	Bag 1				0.274	0.496	0.290	0.173	0.135
	Bag 2				0.236	0.459	0.246	0.142	0.077
	Bag 3				0.221	0.444	0.243	0.143	0.075
MC @ 5°C	Bag 1				0.570	0.900			
	Bag 2				0.421	0.816			
	Bag 3				0.351	0.791			
SC	Bag 1	0.073	0.013	0.132					
	Bag 2	0.091	0.008	0.150					
	Bag 3	0.088	0.007	0.147					
FHB	Zentrum	0.084	0.005	0.185	0.286	0.438	0.149	0.062	0.064
	Peripherie	0.059	0.005	0.160	0.192	0.325	0.117	0.079	0.053
	Überland	0.047	0.005	0.237	0.224	0.399	0.176	0.156	0.059
CADC	innerorts	0.082	0.006	0.165	0.291	0.449	0.147	0.067	0.045
	ausserorts		0.008	0.242	0.243	0.465	0.228	0.254	0.119
	Autobahn 130						0.342	0.272	0.942
	Autobahn 150				0.661	0.965			
WMTC	innerorts,kalt		0.009	0.101	0.244				0.140
	ausserorts		0.007	0.222	0.271				0.096
	Autobahn				0.491				0.499
	innerorts,warm		0.007	0.098	0.201				0.068

 Tabelle 20: Integralwerte NO_x

		Integralwerte CO ₂ [g/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	43.7	47.5	44.6	70.4	109.2	116.2	162.7	150.1
	4 ECE	44.9	64.1	41.8	56.8	99.7	98.1	172.1	157.2
MC @ 23°C	Bag 1				48.9	73.6	75.6	129.9	119.2
	Bag 2				43.3	69.7	67.0	124.0	119.3
	Bag 3				42.7	68.0	65.3	123.0	115.8
MC @ 5°C	Bag 1				59.4	82.0			
	Bag 2				47.8	75.1			
	Bag 3				44.8	73.7			
SC	Bag 1	39.4	36.9	41.3					
	Bag 2	41.2	52.5	40.7					
	Bag 3	39.6	60.2	39.6					
FHB	Zentrum	42.6	60.5	41.8	55.2	90.8	92.2	164.2	148.8
	Peripherie	36.2	52.4	36.5	44.2	81.0	71.9	141.4	132.0
	Überland	33.9	40.6	37.7	39.0	69.3	59.8	117.2	111.8
CADC	innerorts	46.5	71.1	46.2	64.1	102.2	101.5	172.1	177.5
	ausserorts		40.3	41.6	42.6	68.3	63.7	111.6	111.6
	Autobahn 130						90.5	110.5	127.2
	Autobahn 150				70.6	93.7			
WMTC	innerorts,kalt		48.2	34.2	61.3				142.1
	ausserorts		41.6	37.2	43.9				109.4
	Autobahn				61.4				112.5
	innerorts,warm		56.6	30.9	46.6				136.5

 Tabelle 21: Integralwerte CO₂

4.11 Distanzen

		Distanzen [km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	2.02	2.00	2.02	2.04	2.02	1.99	2.02	1.98
	4 ECE	4.06	4.06	4.07	4.07	4.06	4.02	4.02	4.00
MC @ 23°C	Bag 1				8.10	8.11	8.09	8.08	8.09
	Bag 2				8.10	8.11	8.11	8.11	8.09
	Bag 3				8.10	8.12	8.12	8.10	8.09
MC @ 5°C	Bag 1				8.07	8.10			
	Bag 2				8.12	8.11			
	Bag 3				8.11	8.10			
SC	Bag 1	1.87	1.88	1.87					
	Bag 2	1.88	1.89	1.90					
	Bag 3	1.89	1.89	1.89					
FHB	Zentrum	2.45	2.47	2.49	2.46	2.48	2.47	2.48	2.45
	Peripherie	3.80	3.82	3.84	3.84	3.84	3.83	3.85	3.83
	Überland	6.85	7.30	7.30	7.30	7.31	7.29	7.30	7.29
CADC	innerorts	4.46	4.43	4.50	4.48	4.52	4.48	4.50	4.50
	ausserorts		16.32	16.17	16.47	16.44	16.40	16.47	16.41
	Autobahn 130						23.74	23.79	23.75
	Autobahn 150				23.30	24.42			
WMTC	innerorts,kalt		4.09	4.08	4.09				4.07
	ausserorts		9.10	9.06	9.13				9.10
	Autobahn				15.68				15.71
	innerorts,warm		4.06	4.09	4.06				4.08

Tabelle 22: Distanzen gefahrener Zyklen

4.12 Partikel

		Partikel [Anzahl/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	1.74E+14	2.71E+14	3.66E+13	5.91E+12	2.33E+13	2.50E+13	2.82E+12	2.57E+13
	4 ECE	9.81E+13	1.90E+14	2.25E+13	1.17E+12	6.63E+12	2.51E+13	2.53E+11	9.85E+12
MC @ 23°C	Bag 1				4.27E+13	2.64E+12	8.26E+12	5.95E+13	7.43E+12
	Bag 2				8.32E+12	3.00E+12	8.11E+12	7.72E+13	5.87E+12
	Bag 3				5.01E+12	1.01E+12	7.27E+12	3.18E+13	6.22E+12
MC @ 5°C	Bag 1				1.13E+13	2.18E+13			
	Bag 2				2.09E+12	1.51E+12			
	Bag 3				1.61E+12	6.99E+11			
SC	Bag 1	2.38E+14	2.12E+14	4.27E+13					
	Bag 2	1.46E+14	1.64E+14	2.24E+13					
	Bag 3	1.50E+14	1.28E+14	2.78E+13					
FHB	Zentrum	1.33E+14	8.25E+13	3.76E+13	1.41E+09	3.82E+14	3.76E+13	7.81E+11	2.56E+13
	Peripherie	1.72E+14	7.26E+13	3.55E+13	2.34E+09	2.08E+14	2.84E+13	4.47E+11	2.53E+13
	Überland	2.39E+14	6.05E+13	4.43E+13	3.16E+11	1.78E+14	1.52E+13	6.52E+11	1.25E+13
CADC	innerorts	1.91E+14	1.22E+14	3.73E+13	2.85E+12	6.46E+11	2.26E+13	7.94E+11	2.52E+13
	ausserorts		7.94E+13	6.82E+13	5.15E+13	1.89E+12	1.20E+13	7.29E+12	7.23E+12
	Autobahn 130						1.65E+14	9.02E+13	1.86E+13
	Autobahn 150				2.66E+14	7.31E+13			
WMTC	innerorts,kalt		9.71E+13	1.10E+14					1.80E+13
	ausserorts		1.52E+13	3.01E+14					3.46E+12
	Autobahn								1.34E+12
	innerorts,warm		1.28E+12	3.77E+13					1.12E+13

Tabelle 23: Partikel

4.13 Benzol, Toluol, C₂-Benzole und Methan

		Benzol [mg/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	255.9	860.4	130.9	72.6	95.9	257.6	141.4	250.8
	4 ECE	125.1	775.1	90.5	66.8	64.0	278.1	31.9	109.1
MC @ 23°C	Bag 1				51.7	51.2	124.0	50.2	98.7
	Bag 2				45.0	42.7	125.4	21.7	62.8
	Bag 3				45.0	42.4	127.6	19.8	65.8
MC @ 5°C	Bag 1				51.0	140.0			
	Bag 2				34.6	105.0			
	Bag 3				35.3	105.2			
SC	Bag 1	300.6	772.3	192.4					
	Bag 2	169.2	632.0	127.3					
	Bag 3	172.7	661.0	121.5					
FHB	Zentrum	168.5		124.0	82.6	79.8	222.7	50.8	199.8
	Peripherie	158.2		84.1	55.4	52.7	174.1	22.3	162.1
	Überland	176.5		63.6	42.7	42.0	105.7	16.9	73.6
CADC	innerorts	225.2	824.5	117.1	82.5	77.3	255.0	36.2	141.3
	ausserorts		313.7	57.8	40.2	39.4	87.5	13.9	43.9
	Autobahn 130						75.4	67.2	6.8
	Autobahn 150				48.2	55.6			
WMTC	innerorts,kalt		674.8	289.3					187.1
	ausserorts		333.5	73.3					49.0
	Autobahn								12.8
	innerorts,warm		638.1	91.6					135.9

Tabelle 24: Benzol

		Toluol [mg/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	910.2	3038.1	398.2	181.5	262.2	568.0	493.3	605.8
	4 ECE	397.3	1684.7	267.6	158.4	207.1	521.7	77.2	128.4
MC @ 23°C	Bag 1				135.0	138.7	290.4	135.1	179.4
	Bag 2				113.0	117.0	281.7	43.7	34.7
	Bag 3				111.5	116.7	283.9	40.3	35.6
MC @ 5°C	Bag 1				139.0	167.1			
	Bag 2				86.0	111.1			
	Bag 3				87.8	112.6			
SC	Bag 1	1125.5	2821.0	649.4					
	Bag 2	582.8	1685.3	404.4					
	Bag 3	587.3	1396.2	391.5					
FHB	Zentrum	577.8	1188.9	392.8	204.9	258.8	450.4	126.1	173.9
	Peripherie	530.3	1044.3	258.6	133.7	163.5	355.1	59.3	118.8
	Überland	612.9	683.2	200.0	112.0	116.5	234.6	42.1	41.5
CADC	innerorts	754.3	1558.8	355.9	196.0	234.5	497.8	91.8	131.2
	ausserorts		581.6	157.4	97.0	98.3	191.6	37.0	28.5
	Autobahn 130						150.4	156.7	14.4
	Autobahn 150				79.4	109.0			
WMTC	innerorts,kalt		2049.9	2531.0					366.5
	ausserorts		655.3	315.4					37.9
	Autobahn								16.7
	innerorts,warm		1433.4	266.5					183.8

Tabelle 25: Toluol

		C₂-Benzole [mg/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	981.4	3445.8	489.4	206.2	288.3	582.4	645.6	555.0
	4 ECE	435.0	1525.7	306.4	167.9	241.3	498.7	96.0	90.4
MC @ 23°C	Bag 1				154.2	151.4	296.5	145.0	164.6
	Bag 2				120.6	128.6	279.2	45.8	26.9
	Bag 3				118.7	130.0	280.2	42.7	26.1
MC @ 5°C	Bag 1				170.5	19.3			
	Bag 2				87.1	10.1			
	Bag 3				89.7	10.4			
SC	Bag 1	1282.9	3197.8	792.4					
	Bag 2	680.7	1700.0	465.2					
	Bag 3	641.8	1212.9	452.9					
FHB	Zentrum	644.9	1063.2	447.9	227.2	294.8	464.4	138.1	113.7
	Peripherie	576.3	883.5	296.3	144.0	188.5	365.5	65.4	70.8
	Überland	668.7	591.2	238.6	124.3	131.9	249.5	45.3	26.1
CADC	innerorts	833.8	1299.3	406.0	211.9	267.7	477.3	98.4	85.4
	ausserorts		498.0	186.5	103.6	108.4	189.3	40.5	20.5
	Autobahn 130						139.9	171.0	13.3
	Autobahn 150				66.6	113.9			
WMTC	innerorts,kalt		2202.0	6216.4					321.8
	ausserorts		568.9	783.6					30.1
	Autobahn								15.8
	innerorts,warm		1320.4	309.7					142.5

 Tabelle 26: C₂-Benzole

		Methan [mg/km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	72.8	74.6	126.2	53.8	85.1	333.0	57.6	286.3
	4 ECE	28.4	179.1	68.1	50.2	9.4	427.9	42.0	131.1
MC @ 23°C	Bag 1				39.7	20.9	92.2	27.3	90.7
	Bag 2				36.8	18.2	109.6	18.3	72.1
	Bag 3				37.6	19.1	113.3	17.9	75.7
MC @ 5°C	Bag 1				42.5	6.4			
	Bag 2				35.1	3.4			
	Bag 3				37.4	3.5			
SC	Bag 1	74.1	338.7	124.5					
	Bag 2	33.1	449.2	66.8					
	Bag 3	39.5	606.9	66.6					
FHB	Zentrum	35.5	629.0	71.0	59.5	13.9	323.8	33.6	198.0
	Peripherie	34.9	610.9	48.5	44.2	13.9	254.2	19.9	175.3
	Überland	36.9	397.8	33.2	33.0	16.8	130.7	14.7	80.1
CADC	innerorts	64.0	805.6	80.4	68.7	15.6	374.5	35.5	185.1
	ausserorts		309.7	43.4	35.5	20.4	95.9	13.2	60.4
	Autobahn 130						94.9	59.4	13.3
	Autobahn 150				56.2	45.8			
WMTC	innerorts,kalt		438.6	99.0					219.7
	ausserorts		315.9	44.6					58.0
	Autobahn								21.7
	innerorts,warm		579.2	92.6					165.2

Tabelle 27: Methan

4.14 Benzol/HC- und Methan/HC-Verhältnisse

		Benzol / HC							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	0.039	0.039	0.046	0.058	0.051	0.061	0.035	0.053
	4 ECE	0.040	0.057	0.051	0.062	0.045	0.066	0.042	0.105
MC @ 23°C	Bag 1				0.057	0.052	0.062	0.088	0.072
	Bag 2				0.058	0.053	0.062	0.100	0.136
	Bag 3				0.059	0.053	0.062	0.099	0.140
MC @ 5°C	Bag 1				0.055	0.148			
	Bag 2				0.057	0.151			
	Bag 3				0.057	0.149			
SC	Bag 1	0.038	0.038	0.043					
	Bag 2	0.039	0.047	0.048					
	Bag 3	0.039	0.059	0.046					
FHB	Zentrum	0.038		0.048	0.058	0.045	0.058	0.051	0.123
	Peripherie	0.039		0.049	0.058	0.045	0.054	0.047	0.149
	Überland	0.039		0.049	0.055	0.052	0.053	0.050	0.155
CADC	innerorts	0.039	0.065	0.049	0.058	0.047	0.060	0.046	0.106
	ausserorts		0.070	0.049	0.060	0.060	0.056	0.049	0.109
	Autobahn 130						0.068	0.063	0.052
	Autobahn 150				0.090	0.084			
WMTC	innerorts,kalt		0.044	0.015					0.085
	ausserorts		0.067	0.018					0.139
	Autobahn								0.097
	innerorts,warm		0.057	0.044					0.088

Tabelle 28: Verhältnisse von Benzol zu HC

		Methan/ HC							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE	0.011	0.003	0.045	0.043	0.045	0.079	0.014	0.060
	4 ECE	0.009	0.013	0.038	0.047	0.007	0.102	0.055	0.126
MC @ 23°C	Bag 1				0.044	0.021	0.046	0.048	0.066
	Bag 2				0.048	0.023	0.054	0.084	0.156
	Bag 3				0.049	0.024	0.055	0.090	0.161
MC @ 5°C	Bag 1				0.046	0.007			
	Bag 2				0.058	0.005			
	Bag 3				0.060	0.005			
SC	Bag 1	0.009	0.017	0.028					
	Bag 2	0.008	0.033	0.025					
	Bag 3	0.009	0.054	0.025					
FHB	Zentrum	0.008	0.063	0.028	0.042	0.008	0.084	0.034	0.121
	Peripherie	0.009	0.072	0.028	0.046	0.012	0.079	0.042	0.161
	Überland	0.008	0.073	0.026	0.042	0.021	0.066	0.044	0.169
CADC	innerorts	0.011	0.064	0.034	0.049	0.010	0.088	0.046	0.138
	ausserorts		0.069	0.037	0.053	0.031	0.061	0.046	0.151
	Autobahn 130						0.085	0.055	0.102
	Autobahn 150				0.105	0.070			
WMTC	innerorts,kalt		0.029	0.005					0.099
	ausserorts		0.064	0.011					0.165
	Autobahn								0.165
	innerorts,warm		0.051	0.044					0.107

Tabelle 29: Verhältnisse von Methan zu HC

4.15 Ozonbildungspotential

		Ozone-forming Potential [g O ₃ /km]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE								
	4 ECE								
MC @ 23°C	Bag 1								
	Bag 2								
	Bag 3								
MC @ 5°C	Bag 1								
	Bag 2								
	Bag 3								
SC	Bag 1	35.44	66.04	16.55					
	Bag 2								
	Bag 3	19.20							
FHB	Zentrum								
	Peripherie								
	Überland								
CADC	innerorts	25.33	48.65	9.66			15.92	2.74	4.48
	ausserorts		16.21	4.76			5.83	1.09	1.06
	Autobahn 130						4.48	4.30	0.50
	Autobahn 150								
WMTC	innerorts,kalt								
	ausserorts								
	Autobahn								
	innerorts,warm								

		Specific Reactivity [g O ₃ /g NMOG]							
Fahrzeugnummer		3	4	5	6	7	8	9	10
UDC	2 ECE								
	4 ECE								
MC @ 23°C	Bag 1								
	Bag 2								
	Bag 3								
MC @ 5°C	Bag 1								
	Bag 2								
	Bag 3								
SC	Bag 1	4.21	4.19	4.28					
	Bag 2								
	Bag 3	4.08							
FHB	Zentrum								
	Peripherie								
	Überland								
CADC	innerorts	4.04	4.36	4.30			4.19	4.08	3.81
	ausserorts		4.61	4.66			4.41	4.22	3.30
	Autobahn 130						4.96	4.62	4.70
	Autobahn 150								
WMTC	innerorts,kalt								
	ausserorts								
	Autobahn								
	innerorts,warm								

Fahrzeug 3: flüchtige organische Verbindungen

Einzelkomponenten	CADC		SC		SC	
	Urban		Phase 1		Phase 3	
	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km
Ethan	21.86	6.78	21.31	6.61	18.93	5.87
Ethen	100.18	909.61	115.64	1050.03	86.25	783.12
Propan	3.35	1.88	3.76	2.10	2.83	1.59
Propen (Propylen)	64.26	744.08	67.72	784.20	56.73	656.91
2-M-propan (Isobutan)	49.07	66.25	55.11	74.40	36.39	49.13
n-Butan	152.72	203.11	175.68	233.66	116.40	154.81
Propadien (Allen)	1.53	18.60	0.00	0.00	1.20	14.58
Ethin (Acetylen)	36.67	45.84	115.83	144.79	28.99	36.24
t-2-Buten	10.52	146.38	11.53	160.32	9.28	129.10
1-Buten	16.68	171.67	18.68	192.24	14.93	153.66
2-M-propen (Isobuten)	39.22	249.02	43.36	275.35	33.64	213.62
c-2-Buten	7.62	100.76	8.47	111.98	6.20	81.99
Cyclopentan	19.52	52.50	22.49	60.51	14.78	39.77
2-M-butan (Isopentan)	1032.61	1734.78	1202.62	2020.41	782.45	1314.51
n-Pentan	225.66	347.52	280.68	432.24	175.93	270.93
Propin	1.85	11.93	3.95	25.46	1.59	10.27
1,3-Butadien	9.48	128.80	12.64	171.68	8.66	117.66
Cyclopenten	3.70	27.32	3.17	23.39	3.08	22.71
3-M-1-buten	6.68	46.72	9.74	68.11	5.19	36.29
t-2-Penten	13.73	140.48	18.23	186.50	10.43	106.71
2-M-2-buten	19.21	277.61	25.06	362.14	14.29	206.54
1-Penten	8.88	69.15	11.08	86.33	7.55	58.84
2-M-1-buten	14.43	93.97	15.73	102.38	11.17	72.75
c-2-Penten	6.11	62.57	8.30	84.94	4.79	49.07
2,2-DM-butan	63.57	84.55	66.21	88.05	49.00	65.17
unbekannt	67.36	0.00	89.07	0.00	50.01	0.00
2,3-DM-butan	46.46	52.96	55.08	62.80	35.14	40.06
2-M-pentan	240.19	432.34	287.84	518.12	181.85	327.34
3-M-pentan	201.20	416.49	246.69	510.65	150.71	311.97
4-M-t-2-penten	2.49	21.02	3.63	30.67	1.94	16.33
2-M-1-penten	5.26	27.26	6.70	34.70	3.57	18.49
1-Hexen	5.65	34.84	7.37	45.49	4.16	25.66
n-Hexan	173.84	252.07	218.02	316.13	123.48	179.05
C6-Alken	1.66	14.01	2.05	17.29	1.22	10.31
t-3-Hexen	4.05	33.01	5.58	45.54	2.76	22.53
t-2-Hexen	6.26	52.85	8.53	71.97	4.45	37.56
2-M-2-penten	9.39	115.32	12.79	157.09	6.54	80.36
C6-Alken	4.10	34.60	5.67	47.82	2.84	24.01
c-2-Hexen	3.18	26.87	4.95	41.76	2.33	19.64
2,2-DM-pentan	8.00	9.76	9.53	11.63	5.94	7.25
3-M-1-penten	5.60	34.85	7.93	49.31	3.92	24.37
M-cyclopentan	48.30	116.88	62.33	150.83	34.48	83.44
2,4-DM-pentan	18.90	31.18	23.77	39.21	13.22	21.82
1-M-cyclopenten	14.31	199.67	20.21	281.95	10.49	146.40
Cyclohexan	4.21	6.14	6.02	8.79	3.19	4.66
Benzol	257.29	208.40	339.84	275.27	186.28	150.89
2-M-hexan/2,3-DM-pentan	132.81	193.90	173.18	252.84	93.02	135.80
3-M-hexan	119.35	222.00	152.86	284.31	84.35	156.89
Cyclohexen	1.17	6.38	1.78	9.70	0.92	5.00
2,2,4-TM-pentan (Isooctan)	19.26	27.73	25.15	36.21	13.43	19.34
1-Hepten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Heptan	83.47	106.84	110.93	141.99	55.26	70.73

Tabelle 30: VOC Fahrzeug 3, Teil 1

t-2-Hepten/2,4,4-TM-2-penten	38.98	285.70	0.00	0.00	0.00	0.00
M-cyclohexan	0.00	0.00	14.77	29.38	7.72	15.37
2,5-DM-hexan	12.66	21.26	16.22	27.24	9.84	16.53
2,4-DM-hexan	14.84	26.71	20.06	36.11	11.05	19.89
2,3,4-TM-pentan	5.84	7.18	7.38	9.08	3.87	4.76
2,2-DM-hexan	0.00	0.00	4.30	4.86	2.09	2.37
2,3-DM-hexan	12.62	16.90	16.73	22.42	8.75	11.72
Toluol	844.44	3352.44	1227.53	4873.31	617.72	2452.35
2-M-heptan	25.62	30.74	33.70	40.43	17.44	20.93
4-M-heptan	11.56	17.11	14.95	22.12	7.92	11.72
3-M-heptan	28.61	38.62	39.52	53.36	20.50	27.67
2,2,5-TM-hexan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-Octen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Octan	31.56	35.03	29.64	32.90	15.16	16.83
Ethylbenzol	152.53	425.56	248.78	694.08	122.25	341.06
m/p-Xylol	549.76	4667.44	871.13	7395.91	407.32	3458.15
Styrol	10.73	20.93	14.65	28.57	8.78	17.12
o-Xylol	203.31	1522.79	312.50	2340.59	152.87	1145.03
1-Nonen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Nonan	5.41	5.14	7.37	7.00	3.90	3.71
Isopropylbenzol	8.40	19.48	13.24	30.72	6.39	14.82
n-Propylbenzol	35.75	78.66	55.69	122.52	26.51	58.32
1-M-3-E-benzol	166.96	1103.60	263.66	1742.78	128.21	847.48
1-M-4-E-benzol	76.59	506.27	114.54	757.12	58.15	384.37
1,3,5-TM-benzol	78.52	881.01	125.35	1406.47	60.26	676.15
1-M-2-E-benzol	53.91	356.38	83.58	552.49	41.83	276.47
1,2,4-TM-benzol	222.81	1599.78	345.32	2479.40	171.15	1228.86
n-Decan	2.42	2.01	3.49	2.89	1.88	1.56
1,2,3-TM-benzol	42.11	474.21	64.47	725.91	32.18	362.36
Indan	13.00	41.20	21.27	67.42	10.07	31.92
1,3-DE-benzol	8.69	51.47	11.23	66.48	6.67	39.49
1-M-3-n-propylbenzol	18.38	108.81	24.43	144.60	13.57	80.31
1-M-4-n-propylbenzol	6.70	39.65	10.18	60.24	5.70	33.76
1,4-DE-benzol	6.06	35.89	8.24	48.79	4.90	29.00
1,3-DM-5-E-benzol	20.14	178.41	29.48	261.23	16.14	142.96
1-M-2-n-propylbenzol	9.91	58.67	15.72	93.08	7.60	44.98
C4-Alkylbenzol	10.65	63.07	15.83	93.73	8.88	52.56
1,3-DM-4-E-benzol	10.74	95.14	15.38	136.27	8.96	79.38
1,2-DM-4-E-benzol	17.62	156.15	24.34	215.63	14.41	127.67
n-Undecan	3.12	2.31	3.87	2.86	2.54	1.88
2,3-DM-1-E-benzol	3.30	29.23	4.80	42.50	2.72	24.07
1,2,4,5-TeM-benzol	9.32	82.57	13.16	116.60	7.72	68.40
1,2,3,5-TeM-benzol	11.80	104.57	16.63	147.37	9.93	87.97
C4-Alkylbenzol	2.55	15.12	3.81	22.57	2.18	12.89
C4-Alkylbenzol	3.39	20.05	5.61	33.22	2.95	17.49
1,2,3,4-TeM-benzol	2.64	23.36	6.73	59.67	2.34	20.71
Naphthalin	4.25	13.87	6.65	21.67	4.11	13.40
n-Dodecan	3.40	2.24	4.93	3.26	3.51	2.31
Aldehyde/Ketone	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km
Formaldehyd	21.05	188.79	10.08	90.41	21.33	191.31
Acetaldehyd	6.69	45.74	5.01	34.24	5.59	38.21
Aceton	2.85	1.22	2.47	1.06	2.43	1.04
Acrolein	2.49	18.92	2.43	18.46	2.11	16.04
Propionaldehyd	2.10	16.56	1.52	11.96	1.78	14.05
Crotonaldehyd	0.53	5.34	0.36	3.60	0.61	6.13
Methylethylketon	0.48	0.72	0.61	0.91	0.42	0.63
Methacrolein	1.30	8.10	1.33	8.31	1.12	7.00
Butyraldehyd	0.94	6.33	0.78	5.24	0.71	4.77
Benzaldehyd	5.97	0.00	2.96	0.00	6.82	0.00
Valeraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
o-Methylbenzaldehyd	1.47	0.00	0.61	0.00	1.72	0.00
m/p-Methylbenzaldehyd	5.77	0.00	2.15	0.00	7.07	0.00

Tabelle 31: VOC Fahrzeug 3, Teil 2

Fahrzeug 4: flüchtige organische Verbindungen

Einzelkomponenten	CADC				SC	
	Urban		Road		Phase 1	
	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km
Ethan	84.64	26.24	35.29	10.94	42.85	13.28
Ethen	677.14	6148.47	276.81	2513.45	210.27	1909.29
Propan	24.04	13.46	8.22	4.60	20.35	11.40
Propen (Propylen)	403.41	4671.43	177.05	2050.29	101.37	1173.82
2-M-propan (Isobutan)	94.45	127.50	32.25	43.54	105.35	142.22
n-Butan	287.72	382.67	81.95	108.99	357.63	475.65
Propadien (Allen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ethin (Acetylen)	77.33	96.66	37.03	46.29	393.64	492.05
t-2-Buten	51.50	716.42	16.45	228.76	23.39	325.29
1-Buten	68.30	702.79	29.46	303.15	26.89	276.67
2-M-propen (Isobuten)	148.99	946.06	67.10	426.07	92.30	586.10
c-2-Buten	34.73	459.10	12.87	170.18	19.33	255.56
Cyclopentan	51.35	138.14	13.19	35.47	49.54	133.26
2-M-butan (Isopentan)	1480.29	2486.89	444.44	746.66	2202.18	3699.66
n-Pentan	341.65	526.15	101.70	156.62	526.58	810.93
Propin	0.00	0.00	2.40	15.47	8.23	53.10
1,3-Butadien	95.81	1301.04	39.50	536.36	23.84	323.72
Cyclopenten	21.94	161.95	9.27	68.39	8.61	63.53
3-M-1-buten	15.43	107.87	6.99	48.84	19.88	138.93
t-2-Penten	33.10	338.63	9.29	95.08	46.56	476.28
2-M-2-buten	28.68	414.50	12.27	177.29	58.02	838.42
1-Penten	14.30	111.41	8.31	64.70	27.70	215.78
2-M-1-buten	34.65	225.57	8.81	57.32	33.41	217.51
c-2-Penten	13.25	135.72	7.20	73.69	23.44	240.04
2,2-DM-butan	105.73	140.62	37.41	49.76	170.04	226.15
unbekannt	75.63	0.00	21.23	0.00	125.05	0.00
2,3-DM-butan	60.55	69.03	25.80	29.42	101.12	115.28
2-M-pentan	306.04	550.86	105.99	190.79	554.22	997.60
3-M-pentan	210.94	436.65	71.70	148.41	400.35	828.72
4-M-t-2-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	9.94	83.87
2-M-1-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	13.00	67.36
1-Hexen	0.00	0.00	0.00	0.00	6.96	42.92
n-Hexan	235.50	341.48	67.73	98.20	375.67	544.73
C6-Alken	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
t-3-Hexen	0.00	0.00	0.00	0.00	12.78	104.31
t-2-Hexen	0.00	0.00	0.00	0.00	20.01	168.92
2-M-2-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	26.54	325.95
C6-Alken	0.00	0.00	0.00	0.00	12.23	103.25
c-2-Hexen	0.00	0.00	0.00	0.00	6.56	55.36
2,2-DM-pentan	0.00	0.00	0.00	0.00	16.70	20.37
3-M-1-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	17.68	109.95
M-cyclopentan	79.54	192.48	22.87	55.35	118.61	287.03
2,4-DM-pentan	26.34	43.47	7.58	12.50	44.74	73.82
1-M-cyclopenten	16.46	229.55	4.73	66.01	34.61	482.78
Cyclohexan	9.86	14.40	2.84	4.14	19.25	28.11
Benzol	896.44	726.11	257.80	208.82	621.27	503.23
2-M-hexan/2,3-DM-pentan	168.92	246.62	48.58	70.92	316.87	462.62
3-M-hexan	152.82	284.24	43.95	81.75	271.57	505.12
Cyclohexen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,2,4-TM-pentan (Isooctan)	50.96	73.39	14.66	21.11	96.85	139.47
1-Hepten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Heptan	100.52	128.66	28.91	37.00	184.20	235.78

Tabelle 32: VOC Fahrzeug 4, Teil 1

t-2-Hepten/2,4,4-TM-2-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M-cyclohexan	17.37	34.56	4.99	9.94	31.69	63.06
2,5-DM-hexan	30.97	52.03	8.91	14.96	38.25	64.26
2,4-DM-hexan	44.35	79.82	12.75	22.96	40.03	72.05
2,3,4-TM-pentan	11.79	14.51	3.39	4.17	31.58	38.85
2,2-DM-hexan	0.00	0.00	0.00	0.00	19.82	22.40
2,3-DM-hexan	12.70	17.02	3.65	4.90	23.99	32.15
Toluol	1709.62	6787.17	491.66	1951.90	2311.74	9177.62
2-M-heptan	43.53	52.23	12.52	15.02	64.67	77.60
4-M-heptan	14.12	20.90	4.06	6.01	32.04	47.42
3-M-heptan	52.83	71.32	15.19	20.51	69.16	93.37
2,2,5-TM-hexan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-Octen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Octan	22.10	24.53	6.36	7.05	65.69	72.91
Ethylbenzol	307.34	857.48	88.39	246.60	413.54	1153.77
m/p-Xylol	795.69	6755.43	228.83	1942.77	1589.70	13496.55
Styrol	67.67	131.96	19.46	37.95	12.37	24.11
o-Xylol	322.80	2417.80	92.83	695.33	612.29	4586.08
1-Nonen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Nonan	4.65	4.42	1.34	1.27	14.32	13.60
Isopropylbenzol	11.18	25.93	3.21	7.46	19.96	46.32
n-Propylbenzol	41.13	90.49	11.83	26.02	93.26	205.18
1-M-3-E-benzol	230.07	1520.76	66.17	437.35	485.65	3210.18
1-M-4-E-benzol	88.10	582.33	25.34	167.47	208.22	1376.37
1,3,5-TM-benzol	71.44	801.54	20.54	230.51	228.58	2564.62
1-M-2-E-benzol	81.48	538.56	23.43	154.88	156.16	1032.25
1,2,4-TM-benzol	202.64	1454.98	58.28	418.43	664.14	4768.51
n-Decan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3-TM-benzol	38.40	432.37	11.04	124.34	122.23	1376.26
Indan	13.88	44.00	3.99	12.66	37.31	118.29
1,3-DE-benzol	12.02	71.16	3.46	20.47	17.30	102.42
1-M-3-n-propylbenzol	17.39	102.96	5.00	29.61	47.93	283.75
1-M-4-n-propylbenzol	17.61	104.24	5.06	29.98	33.45	198.05
1,4-DE-benzol	14.40	85.23	4.14	24.51	16.91	100.08
1,3-DM-5-E-benzol	15.54	137.69	4.47	39.60	58.09	514.68
1-M-2-n-propylbenzol	9.19	54.43	2.64	15.65	23.58	139.61
C4-Alkylbenzol	14.33	84.86	4.12	24.41	31.68	187.56
1,3-DM-4-E-benzol	13.46	119.21	3.87	34.28	28.67	254.02
1,2-DM-4-E-benzol	18.69	165.58	5.37	47.62	40.25	356.64
n-Undecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,3-DM-1-E-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,4,5-TeM-benzol	7.84	69.46	2.25	19.98	21.65	191.84
1,2,3,5-TeM-benzol	10.35	91.67	2.98	26.36	36.60	324.26
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	6.94	41.06
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	9.16	54.22
1,2,3,4-TeM-benzol	13.44	119.11	3.87	34.25	19.82	175.61
Naphthalin	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Dodecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aldehyde/Ketone	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km
Formaldehyd	54.27	486.77	14.43	129.42	0.00	0.00
Acetaldehyd	17.04	116.57	4.53	30.99	0.03	0.18
Aceton	6.35	2.73	1.69	0.73	1.94	0.83
Acrolein	15.84	120.36	4.21	32.00	0.00	0.00
Propionaldehyd	3.57	28.18	0.95	7.49	0.00	0.00
Crotonaldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Methylethylketon	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Methacrolein	25.82	160.87	6.87	42.78	0.00	0.00
Butyraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Benzaldehyd	33.04	0.00	8.78	0.00	0.00	0.00
Valeraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
o-Methylbenzaldehyd	6.94	0.00	1.85	0.00	0.00	0.00
m/p-Methylbenzaldehyd	26.45	0.00	7.03	0.00	0.00	0.00

Tabelle 33: VOC Fahrzeug 4, Teil 2

Fahrzeug 5: flüchtige organische Verbindungen

Einzelkomponenten	CADC				SC	
	Urban		Road		Phase 1	
	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km
Ethan	12.19	3.78	7.33	2.27	14.88	4.61
Ethen	92.97	844.20	67.60	613.85	118.84	1079.02
Propan	2.78	1.55	1.08	0.60	3.85	2.16
Propen (Propylen)	41.52	480.80	31.04	359.49	47.34	548.14
2-M-propan (Isobutan)	14.00	18.89	6.14	8.29	20.16	27.22
n-Butan	41.87	55.69	17.03	22.64	57.95	77.08
Propadien (Allen)	2.34	28.41	1.89	23.01	3.30	40.12
Ethin (Acetylen)	153.76	192.20	57.72	72.15	238.69	298.36
t-2-Buten	3.32	46.19	1.91	26.51	4.76	66.24
1-Buten	6.16	63.43	4.34	44.65	8.00	82.27
2-M-propen (Isobuten)	16.18	102.76	9.76	62.00	20.45	129.86
c-2-Buten	2.60	34.40	1.40	18.55	3.73	49.34
Cyclopentan	5.18	13.93	2.05	5.52	10.37	27.90
2-M-butan (Isopentan)	251.35	422.26	105.14	176.64	393.13	660.46
n-Pentan	60.93	93.84	23.82	36.68	100.32	154.49
Propin	4.24	27.34	2.79	18.01	6.06	39.11
1,3-Butadien	7.22	98.01	4.66	63.32	9.57	129.98
Cyclopenten	0.43	3.18	0.52	3.84	0.75	5.57
3-M-1-buten	1.82	12.69	0.85	5.93	3.39	23.72
t-2-Penten	4.92	50.35	1.57	16.03	6.92	70.75
2-M-2-buten	5.07	73.21	1.63	23.57	9.30	134.40
1-Penten	3.36	26.14	1.47	11.47	3.94	30.68
2-M-1-buten	4.27	27.82	1.77	11.55	5.05	32.89
c-2-Penten	2.07	21.21	0.74	7.56	3.06	31.36
2,2-DM-butan	16.92	22.50	7.31	9.72	31.01	41.24
unbekannt	16.13	0.00	5.68	0.00	29.21	0.00
2,3-DM-butan	10.34	11.79	3.87	4.42	22.15	25.25
2-M-pentan	62.90	113.22	24.93	44.87	121.51	218.72
3-M-pentan	47.58	98.49	16.84	34.85	90.94	188.24
4-M-t-2-penten	0.54	4.56	0.23	1.98	1.56	13.16
2-M-1-penten	3.82	19.78	0.46	2.39	2.00	10.35
1-Hexen	2.84	17.55	0.93	5.75	1.81	11.17
n-Hexan	45.02	65.28	17.20	24.94	87.03	126.20
C6-Alken	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	8.64
t-3-Hexen	0.78	6.40	0.37	3.03	1.96	15.98
t-2-Hexen	1.05	8.88	0.59	5.02	3.43	28.97
2-M-2-penten	1.93	23.72	0.53	6.53	5.29	64.91
C6-Alken	0.71	6.00	0.00	0.00	1.92	16.22
c-2-Hexen	0.36	3.05	0.24	2.02	1.22	10.31
2,2-DM-pentan	1.27	1.55	0.99	1.21	5.72	6.98
3-M-1-penten	1.29	8.00	0.50	3.13	4.08	25.39
M-cyclopentan	14.17	34.30	5.42	13.11	27.25	65.94
2,4-DM-pentan	4.21	6.95	1.75	2.89	9.19	15.17
1-M-cyclopenten	4.99	69.56	1.23	17.20	8.32	116.02
Cyclohexan	1.44	2.11	0.63	0.93	2.93	4.27
Benzol	119.94	97.15	58.95	47.75	190.53	154.33
2-M-hexan/2,3-DM-pentan	37.11	54.18	13.58	19.83	73.59	107.44
3-M-hexan	33.51	62.33	12.86	23.93	65.37	121.59
Cyclohexen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,2,4-1M-pentan (Isooctan)	5.21	7.50	1.89	2.73	11.36	16.35
1-Hepten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Heptan	23.72	30.37	9.04	11.58	49.25	63.04

Tabelle 34: VOC Fahrzeug 5, Teil 1

2,2-DM-hexan	0.89	1.00	0.49	0.56	2.11	2.38
2,3-DM-hexan	3.22	4.31	1.43	1.92	8.14	10.91
Toluol	348.13	1382.09	153.70	610.20	618.60	2455.85
2-M-heptan	11.12	13.34	3.23	3.87	16.28	19.53
4-M-heptan	8.00	11.83	1.97	2.91	12.50	18.50
3-M-heptan	7.28	9.83	3.18	4.29	16.96	22.89
2,2,5-TM-hexan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-Octen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Octan	5.38	5.97	2.47	2.74	13.97	15.51
Ethylbenzol	59.35	165.59	28.16	78.57	110.46	308.18
m/p-Xylol	223.62	1898.55	98.55	836.68	415.41	3526.86
Styrol	4.31	8.40	2.70	5.27	5.77	11.26
o-Xylol	81.00	606.70	36.58	273.98	153.05	1146.32
1-Nonen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Nonan	1.18	1.12	0.68	0.65	3.13	2.97
Isopropylbenzol	1.91	4.43	0.84	1.94	4.22	9.80
n-Propylbenzol	10.41	22.91	5.10	11.21	21.59	47.50
1-M-3-E-benzol	57.24	378.37	27.46	181.50	112.68	744.82
1-M-4-E-benzol	24.07	159.14	12.01	79.41	47.65	315.00
1,3,5-TM-benzol	25.53	286.46	12.12	136.01	52.86	593.11
1-M-2-E-benzol	17.89	118.23	8.17	54.03	33.67	222.58
1,2,4-TM-benzol	72.79	522.63	33.91	243.46	140.62	1009.65
n-Decan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3-TM-benzol	12.55	141.29	5.73	64.48	23.28	262.10
Indan	4.46	14.15	1.82	5.76	7.24	22.95
1,3-DE-benzol	2.57	15.20	1.16	6.86	4.07	24.09
1-M-3-n-propylbenzol	4.33	25.65	1.91	11.33	7.35	43.53
1-M-4-n-propylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	2.96	17.55
1,4-DE-benzol	0.00	0.00	0.61	3.62	0.00	0.00
1,3-DM-5-E-benzol	6.44	57.03	2.23	19.76	9.53	84.46
1-M-2-n-propylbenzol	3.26	19.29	1.15	6.79	5.05	29.87
C4-Alkylbenzol	2.52	14.93	1.34	7.94	5.14	30.45
1,3-DM-4-E-benzol	1.92	17.01	1.28	11.37	3.83	33.98
1,2-DM-4-E-benzol	3.40	30.09	1.66	14.75	6.02	53.33
n-Undecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,3-DM-1-E-benzol	0.00	0.00	0.39	3.46	1.53	13.59
1,2,4,5-TeM-benzol	1.36	12.09	0.69	6.11	3.36	29.78
1,2,3,5-TeM-benzol	2.81	24.88	1.00	8.82	4.86	43.02
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3,4-TeM-benzol	2.59	22.97	0.68	6.03	2.28	20.17
Naphthalin	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Dodecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aldehyde/Ketone	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km
Formaldehyd	11.10	99.56	10.49	94.07	6.21	55.71
Acetaldehyd	2.11	14.44	1.88	12.84	1.92	13.10
Aceton	1.51	0.65	0.80	0.34	0.92	0.39
Acrolein	1.09	8.25	0.86	6.55	1.19	9.06
Propionaldehyd	0.54	4.27	0.47	3.67	0.55	4.32
Crotonaldehyd	0.00	0.00	0.23	2.30	0.16	1.57
Methylethylketon	0.00	0.00	0.23	0.35	0.19	0.28
Methacrolein	0.00	0.00	0.51	3.18	0.48	3.01
Butyraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	2.54
Benzaldehyd	3.53	0.00	3.04	0.00	2.18	0.00
Valeraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
o-Methylbenzaldehyd	0.91	0.00	0.71	0.00	0.53	0.00
m/p-Methylbenzaldehyd	2.77	0.00	2.78	0.00	1.49	0.00

Tabelle 35: VOC Fahrzeug 5, Teil 2

Fahrzeug 8: flüchtige organische Verbindungen

Einzelkomponenten	CADC					
	Urban		Road		Motorway	
	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km
Ethan	37.32	11.57	11.71	3.63	9.33	2.89
Ethen	338.21	3070.91	112.39	1020.51	119.22	1082.47
Propan	6.38	3.57	1.53	0.86	0.71	0.40
Propen (Propylen)	104.49	1210.03	40.76	472.01	45.49	526.77
2-M-propan (Isobutan)	22.27	30.07	7.12	9.62	3.33	4.50
n-Butan	55.24	73.47	19.02	25.29	9.13	12.15
Propadien (Allen)	7.80	94.86	3.15	38.26	2.68	32.56
Ethin (Acetylen)	636.08	795.10	138.22	172.78	76.72	95.91
t-2-Buten	6.77	94.22	2.43	33.83	1.58	22.00
1-Buten	10.02	103.13	3.76	38.73	3.31	34.10
2-M-propen (Isobuten)	42.11	267.41	15.15	96.20	11.64	73.93
c-2-Buten	5.46	72.22	1.68	22.19	1.28	16.97
Cyclopentan	5.82	15.65	3.18	8.55	1.30	3.50
2-M-butan (Isopentan)	330.66	555.51	126.42	212.39	59.50	99.96
n-Pentan	83.49	128.58	29.48	45.40	13.65	21.02
Propin	15.56	100.33	5.33	34.35	5.17	33.33
1,3-Butadien	18.44	250.41	6.58	89.33	4.65	63.16
Cyclopenten	1.22	8.99	0.42	3.08	0.25	1.88
3-M-1-buten	2.34	16.34	1.01	7.03	0.33	2.34
t-2-Penten	5.93	60.69	2.03	20.78	0.70	7.19
2-M-2-buten	7.60	109.85	2.48	35.83	0.52	7.53
1-Penten	3.36	26.14	0.86	6.73	0.72	5.61
2-M-1-buten	5.18	33.72	1.80	11.72	0.82	5.36
c-2-Penten	2.65	27.14	0.76	7.75	0.39	4.03
2,2-DM-butan	20.16	26.81	8.50	11.31	4.12	5.48
unbekannt	17.82	0.00	6.88	0.00	3.03	0.00
2,3-DM-butan	12.66	14.43	5.26	6.00	2.20	2.51
2-M-pentan	84.82	152.67	32.92	59.26	15.78	28.41
3-M-pentan	57.61	119.26	22.72	47.03	9.43	19.53
4-M-t-2-penten	1.07	9.05	0.26	2.19	0.00	0.00
2-M-1-penten	4.50	23.29	0.69	3.57	0.18	0.91
1-Hexen	3.11	19.22	0.38	2.34	0.45	2.79
n-Hexan	59.62	86.45	22.80	33.06	10.20	14.79
C6-Alken	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
t-3-Hexen	1.70	13.88	0.30	2.41	0.17	1.38
t-2-Hexen	1.65	13.89	0.62	5.24	0.17	1.40
2-M-2-penten	3.44	42.30	0.81	9.89	0.19	2.39
C6-Alken	1.14	9.61	0.32	2.72	0.00	0.00
c-2-Hexen	1.12	9.49	0.35	2.97	0.07	0.58
2,2-DM-pentan	3.22	3.92	1.08	1.32	0.52	0.64
3-M-1-penten	2.28	14.16	0.67	4.17	0.00	0.00
M-cyclopentan	16.66	40.31	6.33	15.32	3.12	7.54
2,4-DM-pentan	5.29	8.73	2.33	3.84	1.08	1.78
1-M-cyclopenten	0.76	10.65	1.77	24.63	0.52	7.19
Cyclohexan	1.28	1.87	0.56	0.82	0.28	0.41
Benzol	283.24	229.42	97.20	78.74	84.57	68.51
2-M-hexan/2,3-DM-pentan	39.43	57.56	16.88	24.65	6.97	10.18
3-M-hexan	36.90	68.63	14.46	26.89	6.45	11.99
Cyclohexen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,2,4-TM-pentan (Isooctan)	4.87	7.01	1.84	2.66	0.77	1.11
1-Hepten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Heptan	26.37	33.75	9.69	12.40	4.97	6.36

Tabelle 36: VOC Fahrzeug 8, Teil 1

t-2-Hepten/2,4,4-TM-2-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M-cyclohexan	3.73	7.42	1.35	2.68	0.67	1.33
2,5-DM-hexan	4.26	7.16	1.66	2.79	0.74	1.24
2,4-DM-hexan	4.60	8.29	1.94	3.48	0.75	1.35
2,3,4-TM-pentan	1.72	2.12	0.92	1.13	0.00	0.00
2,2-DM-hexan	0.00	0.00	0.40	0.45	0.00	0.00
2,3-DM-hexan	3.85	5.16	1.56	2.10	0.74	0.99
Toluol	509.32	2021.98	197.19	782.86	154.59	613.71
2-M-heptan	12.72	15.27	3.52	4.22	1.65	1.98
4-M-heptan	9.67	14.31	2.36	3.50	0.97	1.44
3-M-heptan	8.07	10.89	3.31	4.47	1.52	2.05
2,2,5-TM-hexan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-Octen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Octan	7.19	7.98	2.06	2.28	1.44	1.60
Ethylbenzol	71.99	200.86	28.00	78.11	18.70	52.17
m/p-Xylol	274.91	2334.02	108.60	921.98	80.24	681.25
Styrol	15.20	29.64	4.89	9.54	3.68	7.18
o-Xylol	94.49	707.72	36.06	270.06	26.73	200.18
1-Nonen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Nonan	1.44	1.37	0.59	0.56	0.20	0.19
Isopropylbenzol	3.07	7.12	0.93	2.16	0.41	0.96
n-Propylbenzol	10.42	22.92	4.46	9.80	2.36	5.19
1-M-3-E-benzol	60.10	397.24	24.03	158.86	14.80	97.85
1-M-4-E-benzol	25.43	168.07	10.01	66.15	5.82	38.45
1,3,5-TM-benzol	29.22	327.79	11.66	130.85	7.77	87.18
1-M-2-E-benzol	18.04	119.24	7.05	46.61	4.37	28.89
1,2,4-TM-benzol	73.52	527.89	29.44	211.36	18.68	134.10
n-Decan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3-TM-benzol	12.08	135.99	4.75	53.46	3.17	35.68
Indan	3.86	12.23	1.33	4.22	0.78	2.46
1,3-DE-benzol	1.50	8.90	0.81	4.80	0.42	2.48
1-M-3-n-propylbenzol	3.01	17.84	0.99	5.88	0.73	4.29
1-M-4-n-propylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.96
1,4-DE-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	1.64
1,3-DM-5-E-benzol	5.17	45.77	2.08	18.43	1.17	10.35
1-M-2-n-propylbenzol	1.76	10.44	0.78	4.60	0.36	2.11
C4-Alkylbenzol	2.10	12.42	0.97	5.72	0.56	3.29
1,3-DM-4-E-benzol	2.02	17.88	0.84	7.45	0.49	4.36
1,2-DM-4-E-benzol	4.14	36.70	1.29	11.41	0.81	7.21
n-Undecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,3-DM-1-E-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,4,5-TeM-benzol	1.96	17.37	0.54	4.82	0.42	3.76
1,2,3,5-TeM-benzol	2.15	19.09	0.82	7.24	0.37	3.29
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3,4-TeM-benzol	2.12	18.79	0.35	3.08	0.18	1.57
Naphthalin	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Dodecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aldehyde/Ketone	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km
Formaldehyd	38.40	344.42	16.69	149.71	5.41	48.56
Acetaldehyd	5.73	39.17	2.11	14.42	2.80	19.18
Aceton	2.40	1.03	0.90	0.39	0.93	0.40
Acrolein	4.03	30.62	1.28	9.72	0.96	7.27
Propionaldehyd	1.38	10.92	0.46	3.63	0.27	2.10
Crotonaldehyd	0.78	7.85	0.20	1.98	0.09	0.92
Methylethylketon	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Methacrolein	1.11	6.93	0.34	2.12	0.39	2.43
Butyraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Benzaldehyd	9.87	0.00	4.22	0.00	3.50	0.00
Valeraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
o-Methylbenzaldehyd	1.40	0.00	0.83	0.00	0.66	0.00
m/p-Methylbenzaldehyd	6.55	0.00	3.23	0.00	2.79	0.00

Tabelle 37: VOC Fahrzeug 8, Teil 2

Fahrzeug 9: flüchtige organische Verbindungen

Einzelkomponenten	CADC					
	Urban		Road		Motorway	
	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km
Ethan	8.72	2.70	3.15	0.98	10.09	3.13
Ethen	15.89	144.28	8.12	73.74	55.86	507.25
Propan	1.48	0.83	0.33	0.19	0.94	0.52
Propen (Propylen)	9.86	114.14	4.51	52.25	25.70	297.64
2-M-propan (Isobutan)	6.41	8.65	1.78	2.40	2.58	3.49
n-Butan	16.66	22.15	4.81	6.40	8.98	11.95
Propadien (Allen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	9.11
Ethin (Acetylen)	5.67	7.09	2.76	3.44	16.27	20.34
t-2-Buten	1.12	15.64	0.54	7.50	1.96	27.24
1-Buten	1.62	16.66	0.78	8.01	3.18	32.71
2-M-propen (Isobuten)	8.31	52.74	2.80	17.76	11.30	71.76
c-2-Buten	0.97	12.85	0.41	5.46	1.42	18.72
Cyclopentan	1.93	5.19	0.72	1.94	1.77	4.77
2-M-butan (Isopentan)	95.82	160.98	33.33	55.99	77.59	130.35
n-Pentan	24.68	38.01	8.21	12.64	19.21	29.59
Propin	0.00	0.00	0.22	1.41	1.00	6.47
1,3-Butadien	1.07	14.46	0.57	7.74	2.07	28.12
Cyclopenten	0.00	0.00	0.11	0.82	0.43	3.17
3-M-1-buten	0.57	3.96	0.22	1.51	0.55	3.82
t-2-Penten	1.49	15.25	0.54	5.49	1.08	11.01
2-M-2-buten	1.48	21.46	0.44	6.30	1.13	16.27
1-Penten	0.97	7.57	0.36	2.83	0.95	7.41
2-M-1-buten	1.28	8.33	0.58	3.75	1.35	8.76
c-2-Penten	0.44	4.50	0.18	1.84	0.52	5.29
2,2-DM-butan	8.99	11.96	2.81	3.74	7.00	9.31
unbekannt	5.59	0.00	2.12	0.00	4.95	0.00
2,3-DM-butan	4.45	5.07	1.69	1.92	4.40	5.01
2-M-pentan	23.59	42.47	8.65	15.57	23.45	42.22
3-M-pentan	16.75	34.66	6.65	13.76	18.48	38.26
4-M-t-2-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	1.79
2-M-1-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	1.84
1-Hexen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	2.88
n-Hexan	17.29	25.08	7.39	10.71	17.93	26.00
C6-Alken	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	1.34
t-3-Hexen	0.00	0.00	0.10	0.82	0.27	2.24
t-2-Hexen	0.00	0.00	0.22	1.89	0.44	3.69
2-M-2-penten	0.00	0.00	0.21	2.55	0.57	6.99
C6-Alken	0.00	0.00	0.11	0.89	0.24	2.00
c-2-Hexen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	1.95
2,2-DM-pentan	0.00	0.00	0.33	0.40	1.06	1.29
3-M-1-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	1.97
M-cyclopentan	4.37	10.56	1.60	3.87	5.03	12.17
2,4-DM-pentan	0.00	0.00	0.68	1.11	2.18	3.59
1-M-cyclopenten	0.00	0.00	0.47	6.52	1.25	17.42
Cyclohexan	0.00	0.00	0.15	0.22	0.57	0.84
Benzol	36.31	29.41	13.92	11.28	81.52	66.03
2-M-hexan/2,3-DM-pentan	12.67	18.49	4.93	7.20	15.13	22.08
3-M-hexan	11.38	21.17	4.36	8.11	14.05	26.13
Cyclohexen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,2,4-TM-pentan (Isooctan)	2.09	3.01	0.82	1.18	2.43	3.50
1-Hepten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Heptan	7.37	9.43	3.07	3.93	9.94	12.72

Tabelle 38: VOC Fahrzeug 9, Teil 1

t-2-Hepten/2,4,4-TM-2-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M-cyclohexan	0.99	1.96	0.47	0.93	1.37	2.72
2,5-DM-hexan	1.95	3.27	0.62	1.05	1.64	2.76
2,4-DM-hexan	2.13	3.83	0.60	1.08	1.84	3.31
2,3,4-TM-pentan	0.98	1.21	0.37	0.45	0.84	1.04
2,2-DM-hexan	0.00	0.00	0.17	0.20	0.52	0.59
2,3-DM-hexan	1.48	1.98	0.64	0.86	1.69	2.26
Toluol	91.70	364.03	35.78	142.05	160.46	637.05
2-M-heptan	4.42	5.30	1.40	1.68	3.33	4.00
4-M-heptan	3.31	4.90	1.12	1.66	1.33	1.96
3-M-heptan	2.28	3.07	1.01	1.36	3.40	4.60
2,2,5-TM-hexan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-Octen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Octan	1.76	1.96	0.72	0.80	2.78	3.09
Ethylbenzol	16.71	46.61	6.46	18.01	27.35	76.31
m/p-Xylol	62.89	533.96	23.63	200.60	98.31	834.67
Styrol	0.94	1.83	0.54	1.05	2.70	5.26
o-Xylol	24.05	180.17	8.64	64.75	35.89	268.79
1-Nonen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Nonan	0.00	0.00	0.19	0.18	0.69	0.66
Isopropylbenzol	0.00	0.00	0.24	0.56	1.18	2.73
n-Propylbenzol	2.79	6.15	1.05	2.32	4.61	10.14
1-M-3-E-benzol	17.65	116.64	6.55	43.30	25.50	168.53
1-M-4-E-benzol	7.54	49.81	2.88	19.05	11.08	73.23
1,3,5-TM-benzol	7.88	88.40	3.24	36.32	11.99	134.54
1-M-2-E-benzol	5.21	34.42	1.99	13.14	8.14	53.84
1,2,4-TM-benzol	22.44	161.12	7.97	57.23	31.84	228.60
n-Decan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3-TM-benzol	3.77	42.44	1.50	16.91	5.50	61.93
Indan	1.14	3.61	0.45	1.41	1.50	4.74
1,3-DE-benzol	0.72	4.26	0.32	1.89	1.05	6.20
1-M-3-n-propylbenzol	1.32	7.82	0.54	3.20	1.89	11.17
1-M-4-n-propylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	5.19
1,4-DE-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	4.82
1,3-DM-5-E-benzol	2.01	17.77	0.73	6.48	2.44	21.63
1-M-2-n-propylbenzol	0.00	0.00	0.31	1.82	0.89	5.24
C4-Alkylbenzol	0.50	2.94	0.30	1.77	1.12	6.65
1,3-DM-4-E-benzol	0.50	4.47	0.35	3.10	1.13	10.05
1,2-DM-4-E-benzol	1.18	10.42	0.65	5.80	1.76	15.56
n-Undecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,3-DM-1-E-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	3.26
1,2,4,5-TeM-benzol	1.25	11.03	0.35	3.10	0.72	6.38
1,2,3,5-TeM-benzol	1.03	9.17	0.16	1.45	1.00	8.84
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3,4-TeM-benzol	0.74	6.58	0.22	1.92	0.19	1.70
Naphthalin	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Dodecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aldehyde/Ketone	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km
Formaldehyd	10.74	96.31	4.09	36.69	1.19	10.71
Acetaldehyd	1.57	10.77	0.94	6.42	1.69	11.56
Aceton	3.29	1.42	0.64	0.28	1.17	0.50
Acrolein	0.75	5.72	0.59	4.46	0.88	6.72
Propionaldehyd	0.36	2.81	0.23	1.83	0.37	2.93
Crotonaldehyd	0.00	0.00	0.21	2.11	0.27	2.72
Methylethylketon	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Methacrolein	0.00	0.00	0.32	1.98	0.46	2.86
Butyraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Benzaldehyd	2.52	0.00	1.67	0.00	3.21	0.00
Valeraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
o-Methylbenzaldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
m/p-Methylbenzaldehyd	1.72	0.00	1.25	0.00	2.81	0.00

Tabelle 39: VOC Fahrzeug 9, Teil 2

Fahrzeug 10: flüchtige organische Verbindungen

Einzelkomponenten	Urban		Road		Motorway	
	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km	mg/km	mgO ₃ /km
Ethan	17.85	5.53	5.74	1.78	2.46	0.76
Ethen	104.86	952.17	25.37	230.38	9.72	88.23
Propan	2.35	1.32	0.58	0.33	0.17	0.09
Propen (Propylen)	23.77	275.23	5.40	62.53	4.40	50.95
2-M-propan (Isobutan)	10.30	13.90	3.19	4.30	0.57	0.77
n-Butan	28.84	38.35	8.78	11.68	1.65	2.19
Propadien (Allen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	1.59
Ethin (Acetylen)	5.57	6.97	2.23	2.79	1.65	2.06
t-2-Buten	1.74	24.21	0.42	5.80	0.28	3.95
1-Buten	2.03	20.87	0.52	5.40	0.60	6.14
2-M-propen (Isobuten)	9.43	59.89	3.24	20.59	1.85	11.75
c-2-Buten	1.77	23.35	0.32	4.18	0.19	2.54
Cyclopentan	3.52	9.47	0.99	2.66	0.22	0.59
2-M-butan (Isopentan)	156.39	262.74	50.94	85.58	9.27	15.58
n-Pentan	44.05	67.83	12.90	19.87	2.36	3.63
Propin	0.00	0.00	0.13	0.85	0.20	1.27
1,3-Butadien	2.33	31.65	0.52	7.10	0.14	1.88
Cyclopenten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-M-1-buten	0.00	0.00	0.22	1.50	0.00	0.00
t-2-Penten	1.65	16.83	0.37	3.83	0.14	1.43
2-M-2-buten	1.86	26.81	1.08	15.59	0.09	1.36
1-Penten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	1.50
2-M-1-buten	1.51	9.82	0.43	2.78	0.18	1.18
c-2-Penten	0.82	8.41	0.27	2.81	0.00	0.00
2,2-DM-butan	14.15	18.81	4.51	6.00	0.98	1.30
unbekannt	10.64	0.00	3.52	0.00	0.74	0.00
2,3-DM-butan	8.98	10.23	2.41	2.74	0.56	0.63
2-M-pentan	40.51	72.91	12.14	21.84	2.68	4.82
3-M-pentan	29.32	60.70	9.08	18.79	1.89	3.92
4-M-t-2-penten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-M-1-penten	0.00	0.00	0.09	0.49	0.04	0.23
1-Hexen	0.00	0.00	0.12	0.71	0.08	0.51
n-Hexan	28.91	41.91	8.85	12.84	1.63	2.36
C6-Alken	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
t-3-Hexen	0.57	4.61	0.07	0.60	0.04	0.36
t-2-Hexen	0.36	3.04	0.14	1.16	0.00	0.00
2-M-2-penten	0.76	9.35	0.20	2.48	0.00	0.00
C6-Alken	0.31	2.60	0.08	0.71	0.00	0.00
c-2-Hexen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,2-DM-pentan	1.70	2.07	0.61	0.74	0.07	0.09
3-M-1-penten	0.59	3.65	0.26	1.61	0.00	0.00
M-cyclopentan	10.37	25.09	3.15	7.62	0.53	1.29
2,4-DM-pentan	3.64	6.01	1.11	1.82	0.22	0.36
1-M-cyclopenten	1.92	26.81	0.52	7.21	0.00	0.00
Cyclohexan	2.92	4.27	0.86	1.26	0.20	0.29
Benzol	171.02	138.53	52.07	42.17	8.59	6.95
2-M-hexan/2,3-DM-pentan	23.51	34.33	6.90	10.08	1.35	1.97
3-M-hexan	20.39	37.93	6.04	11.23	1.15	2.14
Cyclohexen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,2,4-TM-pentan (Isooctan)	7.74	11.15	2.46	3.55	0.52	0.74
1-Hepten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Heptan	0.00	0.00	4.13	5.28	0.83	1.06

Tabelle 40: VOC Fahrzeug 10, Teil 1

t-2-Hepten/2,4,4-TM-2-penten	47.86	350.81	0.00	0.00	0.00	0.00
M-cyclohexan	3.18	6.32	0.83	1.64	0.17	0.34
2,5-DM-hexan	3.02	5.08	0.87	1.46	0.17	0.29
2,4-DM-hexan	2.98	5.36	0.88	1.58	0.21	0.39
2,3,4-TM-pentan	3.30	4.06	0.79	0.97	0.14	0.18
2,2-DM-hexan	2.50	2.82	0.57	0.65	0.00	0.00
2,3-DM-hexan	2.43	3.26	0.66	0.89	0.14	0.19
Toluol	136.66	542.54	29.75	118.10	17.35	68.87
2-M-heptan	5.20	6.24	1.70	2.04	0.32	0.39
4-M-heptan	2.49	3.68	0.99	1.47	0.18	0.27
3-M-heptan	4.11	5.55	1.17	1.58	0.24	0.32
2,2,5-TM-hexan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-Octen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Octan	2.97	3.30	1.15	1.27	0.21	0.24
Ethylbenzol	11.83	33.00	3.10	8.64	2.87	8.01
m/p-Xylol	60.60	514.49	13.58	115.32	9.72	82.49
Styrol	1.75	3.40	0.46	0.89	0.23	0.45
o-Xylol	22.79	170.70	5.04	37.77	3.57	26.71
1-Nonen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Nonan	0.89	0.85	0.16	0.15	0.00	0.00
Isopropylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Propylbenzol	1.42	3.11	0.57	1.26	0.42	0.93
1-M-3-E-benzol	10.87	71.84	3.20	21.18	2.46	16.24
1-M-4-E-benzol	4.55	30.10	1.45	9.55	1.29	8.51
1,3,5-TM-benzol	6.69	75.08	1.49	16.72	1.06	11.93
1-M-2-E-benzol	4.32	28.55	1.07	7.04	0.80	5.29
1,2,4-TM-benzol	16.14	115.86	4.15	29.82	3.00	21.56
n-Decan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3-TM-benzol	2.64	29.71	0.93	10.49	0.54	6.07
Indan	0.99	3.13	0.28	0.89	0.14	0.45
1,3-DE-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.92
1-M-3-n-propylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	1.69
1-M-4-n-propylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,4-DE-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,3-DM-5-E-benzol	0.90	7.97	0.25	2.20	0.20	1.76
1-M-2-n-propylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.39
C4-Alkylbenzol	0.60	3.54	0.11	0.67	0.15	0.87
1,3-DM-4-E-benzol	0.41	3.62	0.14	1.27	0.11	0.97
1,2-DM-4-E-benzol	0.68	6.00	0.23	2.05	0.16	1.46
n-Undecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2,3-DM-1-E-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,4,5-TeM-benzol	0.00	0.00	0.09	0.79	0.11	0.95
1,2,3,5-TeM-benzol	0.00	0.00	0.13	1.18	0.09	0.78
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C4-Alkylbenzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1,2,3,4-TeM-benzol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Naphthalin	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-Dodecan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aldehyde/Ketone	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km	mg/km	mgO₃/km
Formaldehyd	5.91	53.04	0.20	1.79	0.16	1.48
Acetaldehyd	1.47	10.05	0.48	3.30	0.34	2.30
Aceton	1.16	0.50	0.45	0.19	0.33	0.14
Acrolein	0.28	2.16	0.16	1.25	0.11	0.87
Propionaldehyd	0.27	2.15	0.09	0.73	0.06	0.50
Crotonaldehyd	0.00	0.00	0.04	0.41	0.03	0.29
Methylethylketon	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Methacrolein	0.21	1.28	0.11	0.67	0.07	0.47
Butyraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Benzaldehyd	1.00	0.00	0.57	0.00	0.40	0.00
Valeraldehyd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
o-Methylbenzaldehyd	0.00	0.00	0.11	0.00	0.08	0.00
m/p-Methylbenzaldehyd	0.67	0.00	0.48	0.00	0.33	0.00

Tabelle 41: VOC Fahrzeug 10, Teil 2

5 Referenzen

- [1] D. Rijkeboer, D. Bremmers, Z. Samaras, L. Ntziachristos: „PM regulation for 2-stroke two-wheelers: Necessity or haphazard legislation?“, Dokumentation zum Vortrag am 12. internationalen Symposium „Transport and Air Pollution“, Band 1, Seiten 145 bis 152, Avignon, Juni 2003.
- [2] J. Czerwinski, P. Comte, S. Napoli, P. Wili: „Summer cold start and nanoparticles of small scooters“, Schlussbericht Vertrag BUWAL / VLR.00.18 (Arbeitsunterlage 23 der Folgearbeiten zu BUWAL-Bericht SRU Nr. 255), Biel 2000.
- [3] Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1950-2020, BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 255, Nachtrag, Bern 2000.
- [4] M. Weilenmann, A.-M. Forss, N. Heeb: „Winterkaltstart von Zweirädern“, Untersuchungsbericht BUWAL Nr. 202114a, Dübendorf 2002.
- [5] J. Czerwinski, P. Comte, P. Wili, U. Matter, T. Mosimann: „Sommerkaltstart und Emissionen verschiedener Zweiräder“, Schlussbericht Vertrag BUWAL / VLR.02.05 (Arbeitsunterlage 30 der Folgearbeiten zu BUWAL-Bericht SRU Nr. 255), Biel 2002.
- [6] J. Czerwinski: „Ermittlung der Fahrzyklen für schwach motorisierte 2-Räder“, BUWAL-Bericht SRU Nr. 255, Arbeitsunterlage 14, Abgasprüfstelle der Fachhochschule Biel, September 1999.
- [7] P. de Haan, M. Keller: „Real world driving cycles for emission measurements: ARTEMIS and Swiss cycles“, BUWAL-Bericht SRU Nr. 255, Arbeitsunterlage 25, INFRAS Bern, März 2001.
- [8] R. Gense, D. Elst: „Towards meaningful real-world emission factors for motorcycles: An evaluation of several recent TNO projects“, Dokumentation zum Vortrag am 12. internationalen Symposium „Transport and Air Pollution“, Band 1, Seiten 161 bis 168, Avignon, Juni 2003.
- [9] D. Ajtay, M. Weilenmann, P. Soltic: „Towards accurate instantaneous emission models“, Dokumentation zum Vortrag am 12. internationalen Symposium „Transport and Air Pollution“, Band 1, Seiten 137 bis 144, Avignon, Juni 2003.
- [10] D. Ajtay, M. Weilenmann: „Static and Dynamic Instantaneous Emission Modelling“, Vortrag TECAT-Informationstag, EMPA Dübendorf, 2003.
- [11] M. K. Eberle: Vorlesungsskript zur Vorlesung „Ökologische Aspekte der individuellen Mobilität“, Laboratorium für Verbrennungsmotoren und Verbrennungsforschung, ETH Zürich, 2001.

- [12] M. Weilenmann, P. Soltic, C. Saxer, A.-M. Forss, N. Heeb: „Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold start emissions at different temperatures“, Dokumentation zum Vortrag am 12. internationalen Symposium „Transport and Air Pollution“, Band 1, Seiten 129 bis 136, Avignon, Juni 2003.
- [13] C. J. Saxer, A.-M. Forss, M. Weilenmann, N. Heeb: „Benzene Emission Factors of the latest Diesel- and Gasoline-fueled Passenger Cars within the Common Artemis Driving Cycle“, Dokumentation zum Vortrag am 12. internationalen Symposium „Transport and Air Pollution“, Band 2, Seiten 153 bis 158, Avignon, Juni 2003.
- [14] N. Heeb, A.-M. Forss: „Methan- und Benzol-Basisemissionsfunktionen von benzinbetriebenen Personenwagen“, EMPA-Forschungsbericht Nr. 172607/1.
- [15] D. B. Kittelson: „Engines and Nanoparticles: A Preview“, Journal of aerosol science, vol. 29, p. 575 - 588, Oxford 1998.
- [16] M. Mohr: „Partikelausstoss von benzinbetriebenen Personenwagen“, EMPA-Forschungsbericht Nr. 200069.