



Emanuel Martens, BSc

Auslegung einer CVS-Anlage für Zweiräder und Kleinmotoren

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Vorstand

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Betreuender Professor

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roland Kirchberger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Betreuer

Dipl.-Ing. Niko Bretterklieber
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Schacht

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Oktober 2017

Vorwort

Diese Masterarbeit entstand am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz im Forschungsbereich Konstruktion und Auslegung.

Mein Dank gilt dem Institutsvorstand Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder und dem Leiter des Forschungsbereichs Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roland Kirchberger für die Möglichkeit, diese Masterarbeit schreiben zu dürfen.

Ich möchte mich auch bei Dipl.-Ing. Dr. techn. Schmidt Stephan und Dipl.-Ing. Roland Margelik für das Zustandekommen dieser Arbeit bedanken. Ein besonders großes Dankeschön möchte ich auch an meine beiden Betreuer Dipl.-Ing. Niko Bretterklieber und Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Schacht aussprechen, die mich bei all meinen Fragen und Versuchen tatkräftig unterstütz und kompetent betreut haben.

Der größte Dank gilt meiner Frau und meinen Eltern für die Unterstützung und das Vertrauen während meines gesamten Studiums.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VII
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	IX
ZUSAMMENFASSUNG	XI
ABSTRACT	XIII
1 EINLEITUNG	1
2 GESETZESLAGE	2
2.1 EMISSIONSGRENZWERTE KATEGORIE-L	3
2.2 EMISSIONSGRENZWERTE NON-ROAD SI MOTOREN < 19 kW	9
2.3 VERDÜNNUNGSSYSTEM	11
2.3.1 Verdrängerpumpe (PDP-CVS)	14
2.3.2 Kritisch durchströmtes Venturirohr (CFV-CVS)	15
2.3.3 Elektronische Durchflusskompensation (EFC-CVS)	17
2.3.4 Offenes System	19
2.4 GASPROBENAHMESYSTEME	22
2.4.1 Probenahmesystem für Beutelbefüllung	27
2.4.2 Probenahmesystem für modale Messung	28
2.5 PROBENAHMESYSTEM FÜR PARTIKELMASSE (PM)	30
2.6 PROBENNAHME SYSTEM FÜR PARTIKELANZAHL PN	35
2.7 VERWENDBARE MATERIALIEN	39
2.8 STEUERUNG & DATENAUFZEICHNUNG	40
3 BESTANDSAUFNAHME	41
3.1 ANLAGENAUFBAU	41
3.2 GESAMTVOLUMENSTROMMESSUNG	45
3.3 PROPORTIONALER PROBENSTROM	49
3.4 ANALYSEGERÄT AVL AMA i60 D1	51
3.5 FEHLERANALYSE	55
3.6 KONDENSATIONSBETRACHTUNGEN	58
3.7 VERGLEICHSMESSUNG AN DER CVS-ANLAGE	64
3.7.1 Abgasgegendruckmessungen	64
3.7.2 Emissionsmessungen	76
4 ANLAGEN DIMENSIONIERUNG UND AUSLEGUNG	92
4.1 GRUNDLEGENDE ANFORDERUNGEN	92
4.2 PM UND PN MESSUNGEN	92
4.3 VERDÜNNUNGSSYSTEM	93
4.4 TOTZEIT	100
4.5 ÜBERPRÜFUNG DES GESAMTSYSTEMS	101
4.6 SYSTEMSPÜLUNG	101
4.7 STEUERUNG	101
4.8 PACKAGING	101
5 KONZEPTSTUDIE	102
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	109
LITERATURVERZEICHNIS	110
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	113
TABELLENVERZEICHNIS	116
ANHANG	117

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Griechische Formelzeichen

ρ	kg/m ³	Dichte
φ	%	Relative Feuchte
η	-	Wirkungsgrad
κ	-	Isentropen Exponent

Lateinische Formelzeichen

A	m ²	Querschnittsfläche
be	g/kWh	effektiver spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	m/s	Geschwindigkeit
Cd	-	Discharge coefficient
DF	-	Verdünnungsfaktor
Hu	J/kg	Heizwert
K	-	Verstärkungsfaktor
K		Konstante
Kv		Kalibrierkoeffizient
L_{min}	kg _I /kg _B	Mindestluftbedarf
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	kg/mol	Molare Masse
n	U/min	Drehzahl
p	bar	Druck
P	(k)W	Leistung
P_v	kPa	Abs. Druck am Eintritt des Venturirohrs
Q	m ³ /min	Durchfluss
R_s	J/kgK	spezifische Gaskonstante
R	J/molK	universelle Gaskonstante
T	K	Thermodynamische Temperatur
t	s	Zeiteinheit
t^*	s	Alternative Zeiteinheit
T_v	K	Temperatur am Eintritt des Venturirohrs
V	m ³	Volumen
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom

Weitere Indices und Abkürzungen

Bag	Abgasbeutel
CI	Selbstzündungsmotor (compression ignition)
CLD	Chemolumineszenz Detektor
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
corr	korrigiert
CFV	Kritisch durchströmtes Venturirohr
CS	Catalytik stripper

CVS	Constant Volume Sampling
DA	Verdünnungsluft (Dilution Air)
DAF	Verdünnungsluft Konditioniereinheit
DF	Verdünnungsfaktor (Dilution Factor)
DF	Verschlechterungsfaktor
DI	Direkteinspritzung
DT	Verdünnungstunnel (Dilution Tunnel)
e	effektiv
EEPS	Engine exhaust particle sizer
EFC	Elektronische Durchflussregelung
Ex	exhaust
FC	Durchsatzregeleinrichtung
FH	Filterhalter
FM	Durchsatzmesseinrichtung
ges.	gesamt
GMD	Geometrie mean diameter
HC	Kohlenwasserstoff
HE	Wärmetauscher
HFID	Beheizter Flammenionisationsdetektor
IRD	Nichtdispersiver Infrarot Detektor
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
MC	Mischkammer (Mixing Chamber)
MW	Messwert
N (als Indizes)	Normzustand (1,013 bar; 273,15 K)
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot Detektor
NMHC	Nicht Methan HC
NO _x	Stickoxide
NP	Nano Partikel
NRS	Fremdzündungsmotoren mit einer Bezugsleistung unter 56 kW, die nicht in der Klasse NRSh inbegriffen sind
NRSh	handgehaltene Fremdzündungsmotoren mit einer Bezugsleistung unter 19 kW
P	Pumpe
PCF	Partikel Vorklassierer
PDP	Verdrängerpumpe
PI	Fremdzündungsmotor
PMP	Particle measurement programme
PN	Partikelanzahl
PSP	Probenahmesonde
PTT	Verbindungsrohr
RFS	Range full scale
SDT	Sekundärverdünnungstunnel
SI	Fremdzündungsmotor (spark ignition)
SL	Sekundärluft
SULEV	Super Ultra Low Emission Vehicle
THC	Total HC
TP	Tailpipe
TT	Auspuff Anschlußrohr (Tailpipe Tunnel)
WMTC	Worldwide harmonized Motorcycle Test Cycle

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Emanuel Martens

Graz, Datum

Zusammenfassung

Für die Typenzulassung von Zweiradfahrzeugen wird vom Gesetzgeber nach wie vor verlangt, diese auf einem Rollenprüfstand mit vorgegebenen und vereinheitlichten Fahrzyklen (WMTC, ECE R47/R40) auf Emissionen zu untersuchen. Die dabei vom Gesetzgeber festgelegten Emissionsgrenzwerte, momentan gilt Euro 4, ab 2020 Euro 5, werden stetig verschärft und stellen dabei immer größere Anforderungen an die Emissions-Messtechnik.

Ziel dieser Arbeit ist es, die am Zweirad-Rollenprüfstand der TU Graz verbaute Abgas auffang- und Abgassammelanlage (CVS-Anlage = Constant Volume Sampling) auf die Eignung für zukünftige Anforderungen und Emissionslimits sowie auf die Übereinstimmung mit geltenden Verordnungen zu untersuchen. Wegen der für Zweiräder mit Euro 4 hinzugekommenen Limitierung der emittierten Partikelmasse für Dieselmotoren und Benzin-Direkteinspritzer ab Euro 5 wurde zusätzlich ein mögliches neues Anlagenkonzept entworfen.

Der erste Abschnitt dieser Arbeit beschäftigt sich eingehend mit den neuesten gesetzlichen Anforderungen an die Prüf- und Messtechnik für die Abgasemissionsmessung des Typengenehmigungsverfahrens. Dabei wurde neben den europäischen Verordnungen für Zweiräder und Kleinmotoren auch die US-amerikanische Gesetzgebung herangezogen. Im Anschluss wird die am Zweiradrollenprüfstand bestehende CVS-Anlage genauer hinsichtlich Volumenstrom- und Probenstrommessung sowie deren Regelung, Analysatorgrenzen, Fehlerpotential und Kondensatbildung untersucht.

Im Laufe der Arbeit, aber insbesondere bei der Ausarbeitung eines neuen Anlagenschemas, hat sich die Grundsatzfrage aufgetan, ob eine zukünftige CVS-Anlage geschlossen oder offen ausgeführt werden soll. Um Befürchtungen hinsichtlich der Beeinflussung des Motorbetriebes durch den in der geschlossenen Anlage erzeugten Unterdruck auf den Grund zu gehen, wurde die offene CVS-Anlage des Zweiradrollenprüfstandes so modifiziert, dass sie auch als geschlossene Anlage fungiert. An beiden Anlagen wurden daraufhin Vergleichsmessungen mit einem Zweiradfahrzeug, Zweitaktmotor mit 50ccm, hinsichtlich der Abgasgegendruckschwankungen und der Emissionen durchgeführt. Die Messergebnisse haben gezeigt, dass ein Einfluss auf die Emissionen, insbesondere in Schub- und Leerlaufphasen, deutlich erkennbar ist. Des Weiteren wurde das beim Testfahrzeug zusätzlich verbaute Sekundärluftsystem durch den erzeugten Unterdruck der geschlossenen Anlage beeinflusst. Auch eine Veränderung der Gasdynamik ist nicht auszuschließen.

Abschließend werden, nach grundlegenden Dimensionierungen der Anlage, verschiedene Konzept-Schemata für zukünftige Anlagen vorgestellt. Trotz der erkennbaren Emissionsunterschiede bei Zweitaktmotoren zwischen beiden Varianten, geht die Empfehlung hin zu einer geschlossenen Anlage.

Abstract

For the type approval of two-wheeled vehicles, the legislator still requires to examine them for emissions, on a chassis dynamometer with predetermined and standardized driving cycles (WMTC, ECE R47 / R40). The emission limit values set by the legislator, currently Euro 4 is valid and from 2020 on Euro 5, are continuously becoming smaller and cause therefore increasing requirements for the emission measurement technology.

The aim of this work is to investigate the suitability of the exhaust catching- and samplingsystem (CVS system = Constant Volume Sampling) used on the chassis dynamometer of the Technical University of Graz, for future requirements and emission limits as well as the compliance with applicable regulations. Because of the limitation of the emitted particle mass for diesel engines, which was introduced for two-wheeled vehicles with Euro 4 and for petrol direct injection starting from Euro 5, a possible new system concept was also developed.

The first section of this thesis focuses on the latest legal requirements for the test and measurement technology for the exhaust emissions measurement of the type approval procedure. In addition to the European regulations for two-wheelers and small engines, US legislation was also used. In the following, the existing CVS system at the two-wheel chassis dynamometer is investigated more closely with regard to volumetric flow and sample flow measurement as well as to regulation, analyzer limits, fault potential and condensation.

In the course of the work, but particularly in the preparation of a new layout scheme, the fundamental question has been raised as to whether a future CVS system should be a closed or open system. The open CVS system of the two-wheel chassis dynamometer has been modified so that it also functions as a closed system in order to examine the concerns about influencing the engine operation by the negative pressure generated in the closed system. At both systems comparative measurements were carried out with a two-wheeled vehicle, two-stroke engine with 50 cc, with regard to exhaust gas pressure fluctuations and emissions. The results of the measurements have shown that an influence on the emissions, in particular in the acceleration and idling phases, is clearly visible. Furthermore, the secondary air system installed in the test vehicle was influenced by the generated negative pressure of the closed system. A change in the gas dynamics cannot be excluded.

Finally, various conceptual schemes for future systems are presented, according to basic dimensions of the construction. Despite the discernible emission differences of two-stroke engines between the two variants, the recommendation goes to a closed system.

1 Einleitung

Zweiräder sind ein nicht mehr vernachlässigbarer Produzent von gasförmigen und Partikelemissionen. Besonders ihr Beitrag an Emissionen in Ballungszentren ist durch die starke Reglementierung von PKW Emissionen deutlich angestiegen. Die Abbildung 1-1 zeigt die Größe des Zweiradfahrzeugfuhrparks der EU28 Staaten im Jahre 2014. Um den Anteil an Emissionen von Kategorie-L Fahrzeugen zu reduzieren, werden das Typengenehmigungsverfahren nach Verordnung EU 168/2013 und damit auch die Emissionslimits in zwei Stufen verschärft. Die Euro 4 Abgasnorm ist für neue Fahrzeugtypen seit 2016 gültig, die Euro 5 Abgasnorm wird mit 2020 für neue Fahrzeugtypen in Kraft treten.

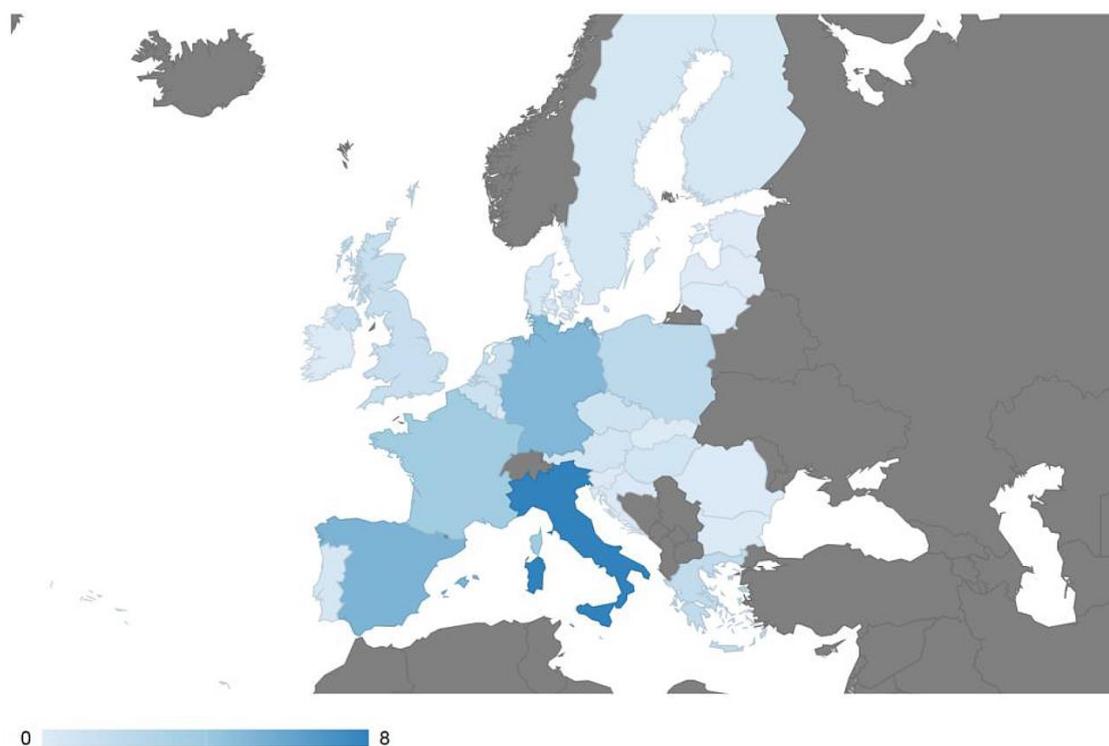


Abbildung 1-1: Fuhrpark an Zweiradfahrzeugen der EU28 Staaten in 2014 (Legendenskala in Millionen Fahrzeugen) [8]

Ziel dieser Arbeit ist es, die damit verbundenen neuen Herausforderungen und Anforderungen an die Emissionsmessung herauszuarbeiten und die Eignung der bestehenden CVS-Anlage am Rollenprüfstand für zukünftige Messungen festzustellen. Des Weiteren wird ein geeignetes Konzept für eine „state of the art“ CVS-Anlage entworfen. Diese Arbeit soll als Grundlage und Entscheidungshilfe für das weitere Verfahren mit der bestehenden CVS-Anlage am Zweiradrollenprüfstand der TU Graz dienen.

Im nachfolgenden Kapitel „Gesetzeslage“ werden die gesetzlichen Anforderungen an die Emissionsmessung diskutiert. Die sich daraus ergebenden Grundkonzepte werden im Anschluss den Anforderungen, Berechnungen und Messungen aus den Kapiteln 3 „Bestandsaufnahme“ und 4 „Anlagen Dimensionierung und Auslegung“ gegenübergestellt. Im Kapitel Konzeptstudie werden mehrere Anlagenkonzepte skizziert und diskutiert.

2 Gesetzeslage

Für die Zulassung von neuen Fahrzeugen und Motoren, müssen diese ein umfassendes Typengenehmigungsverfahren durchlaufen. Dabei werden die Fahrzeuge/Motoren einer Reihe von Prüfungen zur Einhaltung von Grenzwerten unterzogen. Für die Prüfung von Emissionsgrenzwerten wird eine CVS-Anlage benötigt. Der genaue Ablauf solcher Prüfungen, die zu verwendenden technischen Einrichtungen und die Ergebnisanalyse, werden in den jeweiligen Verordnungen der Länder (EU, USA, Japan, usw.) genau vorgeschrieben.

Im folgenden Kapitel werden die in Tabelle 2-1 aufgeführten Regulierungen und Verordnungen hinsichtlich ihrer Anforderungen an das CVS-System diskutiert. Es werden auch Verordnungen für „nicht für den Straßen Verkehr zugelassene Motoren“ (von hier an „Non-Road Motoren“) herangezogen, da die betrachtete CVS-Anlage sowohl für einen Zweiradrollenprüfstand als auch für einen Motorenprüfstand für Motoren bis 19 kW eingesetzt werden soll. Zur Verdeutlichung der Anforderungen und der technischen Spezifikationen werden neben den europäischen Verordnungen auch US-Regulierungen herangezogen. Durch die momentane Vorreiterstellung der Amerikaner in Sachen Emissionsbegrenzung ist es durchaus möglich, dass Verschärfungen in den US-Regulierungen auch in den EU-Verordnungen angeglichen werden.

Tabelle 2-1: Zutreffende Regulierungen und Verordnungen

Verordnungen und Richtlinien	Anwendungsbereich
EU Verordnung Nr 168/2013	Motorräder
EU Verordnung Nr 134/2014	Motorräder
EU Verordnung 2016/1628	„Non-Road“ Motoren
EPA-CFR-part86-subpartE/F	Motorcycles
EPA-CFR-part1054	New Small „Non-Road“ SI Engines
EPA-CFR-part1065	Engine Testing Procedures

Dabei soll lediglich auf die Grundkonzepte und grundlegenden Anforderungen zur Realisierung einer konformen CVS-Anlage und ihrer Komponenten eingegangen werden.

2.1 Emissionsgrenzwerte Kategorie-L

Die Emissionsgrenzwerte haben sich seit Euro 1 enorm verschärft. Abbildung 2-1 zeigt die Entwicklung der Grenzwerte von Euro 1 aus dem Jahre 1999 bis Euro 5 im Jahre 2020. Die roten Pfeile verdeutlichen die notwendige Reduzierung der Euro 3 Grenzwerte um Euro 5 zu erfüllen.

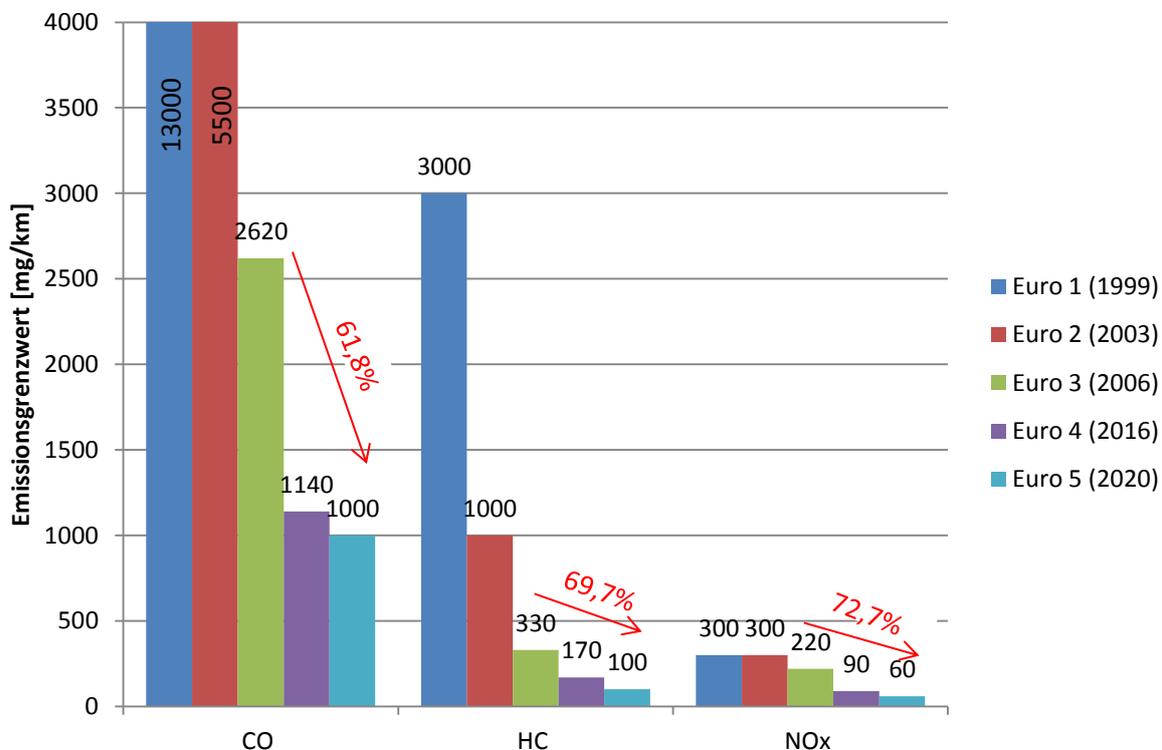


Abbildung 2-1: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für ein Motorräder der Klasse L3e mit $H \geq 150\text{ccm}$ und $v \geq 130\text{ km/h}$

Gleiches zeigt Abbildung 2-2 für ein Fahrzeug der Klasse L1e-B ($H \leq 50\text{ ccm}$). Die Besonderheit bei Fahrzeugen dieser Klasse ist, dass bis einschließlich Euro 3 nur der Summenwert aus HC und NOx reglementiert war. Aus diesem Grund wurde zum besseren Vergleich auch der Summenwert für Euro 4 und Euro 5 aufgeführt. Die Emissionen müssen verglichen mit dem Euro 3 Grenzwert bis 2020 um 86,6% abnehmen.

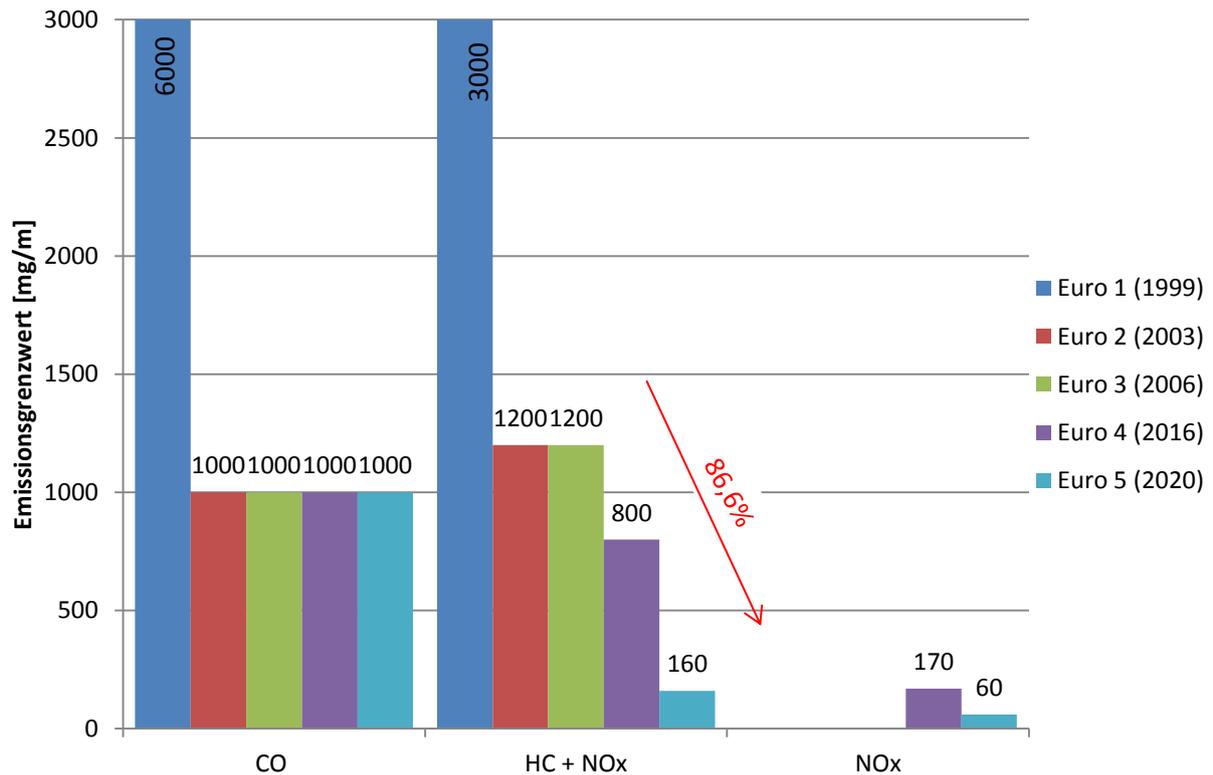


Abbildung 2-2: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für einen Roller der Klasse L1e-B

Die Unterteilung der Fahrzeuge der Kategorie-L in verschiedene Klassen und Unterklassen ist in Tabelle 2-2 dargestellt. Die momentan zur Anwendung zu bringende Emissions-Norm für die Typengenehmigung ist die Euro 4, seit 2016 anfänglich nur für neue Fahrzeugtypen und mit dem Jahr 2017 auch für bereits bestehende Fahrzeugtypen. Mit dem 1. Januar 2020 kommt die Euro 5 für neue Fahrzeugtypen zur Anwendung, im Jahr 2021 dann auch für bereits bestehende. Die Grenzwerte für Euro 4 sind im Anhang in Tabelle 0-1 zu finden, jene für Euro 5 im Anhang in Tabelle 0-2. Ein genauer Zeitplan für die Anwendung der jeweiligen Grenzwerte und Verordnungen kann Tabelle 0-3 entnommen werden.

Tabelle 2-2: Fahrzeugtypen und Unterklassen nach Verordnung (EU) Nr. 168/2013 [4]

	Type	Wheels	C [cm ²]		Speed [km/h]	Power [kW]	Mass [kg]	Examples	
L1e-A L1e-B	Powered cycle Two-wheel Moped	2	≤50	+	≤25 ≤45	≤1 ≤4		 	
L2e	Three-wheel Moped	3	≤50	+	≤45	≤4	≤270	 	
L3e-A1 L3e-A2 L3e-A3	Motor-cycle (also depending on power/weight ratio)	2	≤125	or	>50	≤11 ≤35		 	
L4e	Motor-cycles with sidecars	3 asym.	>50	or	>45				
L5e-A L5e-B	Tricycles	3 sym.	>50	or	>45			 	
L6e-A L6e-B	Light quad Light mini car	4	≤50	+	≤45	≤4 ≤6	≤425	 	
L7e-A L7e-B L7e-C	On-road quad All-terrain vehicles Heavy mini car	4			≤90 ≤90	≤15 ≤15 ≤15	≤450 (600 for goods)	  	

Die Phase 1 der Umwelt-Effekt Studie zur Euro 5 Stufe für Kategorie-L Fahrzeuge vom Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission [8], bei der eine repräsentative Auswahl an momentan auf dem Markt befindlichen Kategorie-L Fahrzeugen auf deren Abgasemissionen untersucht wurde, um daran den Aufwand und die Kosten sowie die Machbarkeit der Euro 5 Norm aufzuzeigen, ist zu folgenden Ergebnissen gekommen:

Es wurden die Daten für 200 verschiedene Modelle der Kategorie L1e aus der 2014 KBA Datenbank zusammengetragen. Für die Fahrzeuge der Kategorie-L1e ist zu bemerken, dass hier für THC und NO_x der Summengrenzwert betrachtet wird, da dies bis Euro 3 so vorgeschrieben war. Die Abbildung 2-3 zeigt den prozentualen Anteil der L1e Fahrzeuge, die den entsprechenden Summengrenzwert für NO_x und HC erfüllen, sowohl für Euro 4 als auch für Euro 5, mit und ohne Verschlechterungsfaktor (DF). Die Abbildung 2-4 zeigt den prozentualen Anteil der Fahrzeuge, die den CO Grenzwert erfüllen. Bemerkenswert ist das kein Roller mit Stand 2014 dem Euro 5 Grenzwert für THC und NO_x genügt. Aufgrund des gebildeten Summenwertes ist eine Aussage darüber, ob die THC oder NO_x Emissionen ausschlaggebender sind nicht möglich.

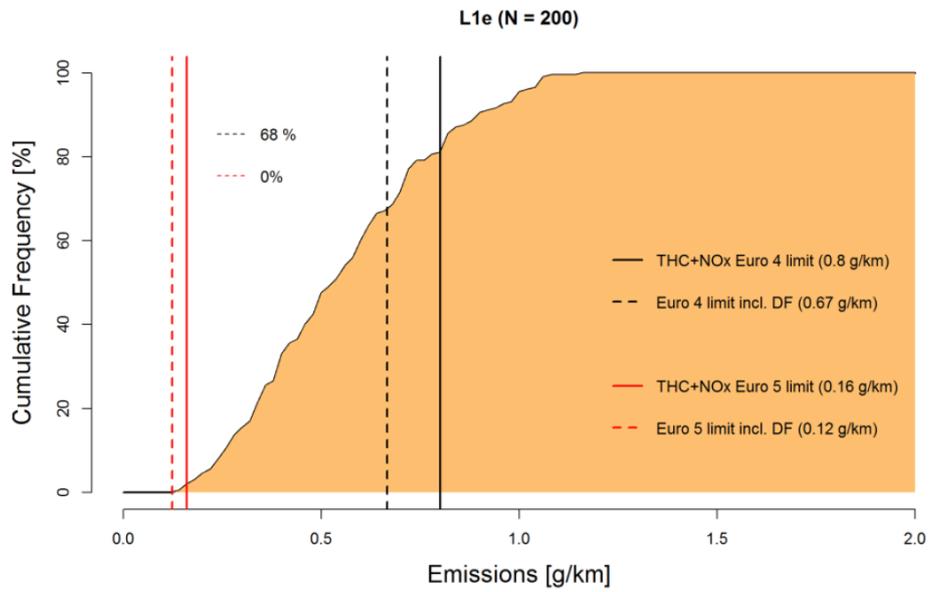


Abbildung 2-3: THC+NOx Typ1 Testwerte für L1e PI Fahrzeuge[8]

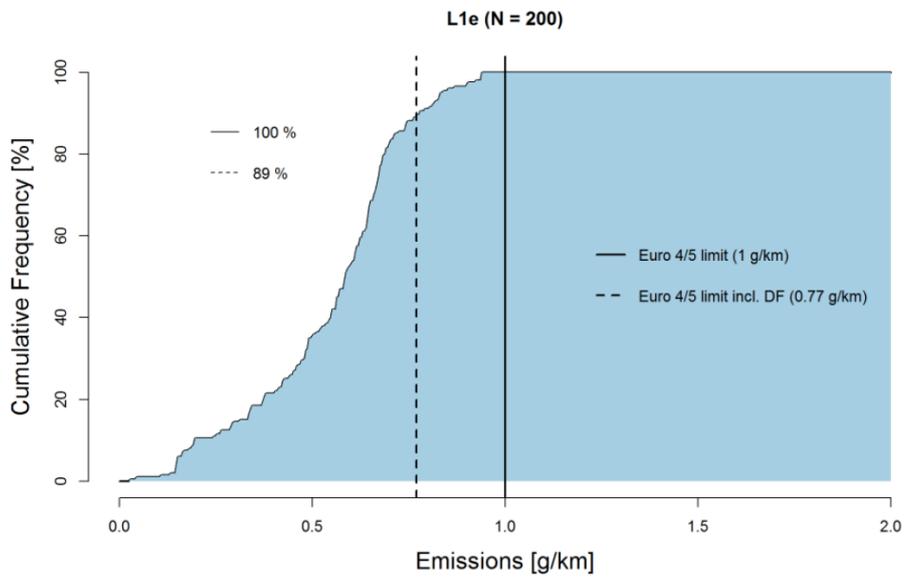


Abbildung 2-4: CO Typ1 Testwerte für L1e PI Fahrzeuge[8]

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Emissionswerte des Typ1 Tests für Fahrzeuge der Kategorie L3e. Die Daten für 1730 verschiedene Modelle für PI und PI-Hybrid Fahrzeuge der Kategorie L3e wurden für die Umwelt-Effekt Studie [8] aus der KBA Datenbank (Stand 2014) zusammengetragen.

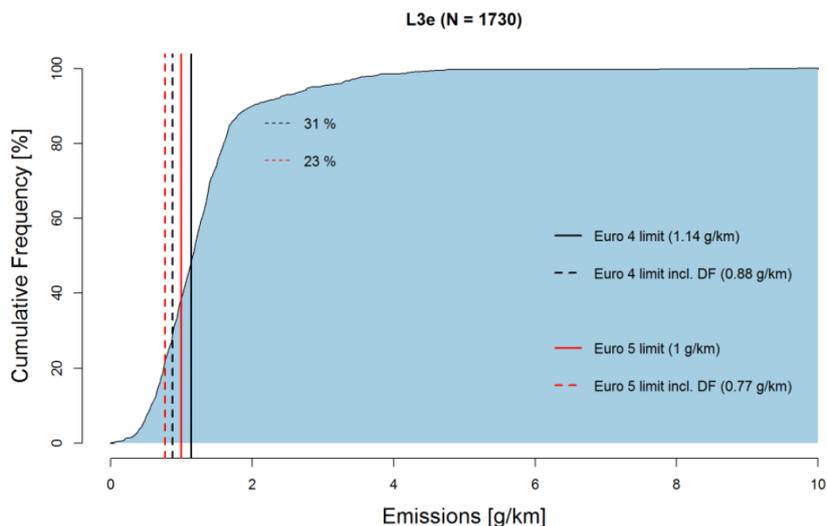


Abbildung 2-5: CO Typ1 Testwerte für L3e Fahrzeuge (PI und PI Hybrid Modelle) [8]

Wie in Abbildung 2-5 ersichtlich, liegen nur 23% (393 Motorräder) mit Berücksichtigung des Verschlechterungsfaktors unter dem EURO 5 Limit für CO. Bei THC sind es nach Abbildung 2-6 nur 7% (121 Motorräder).

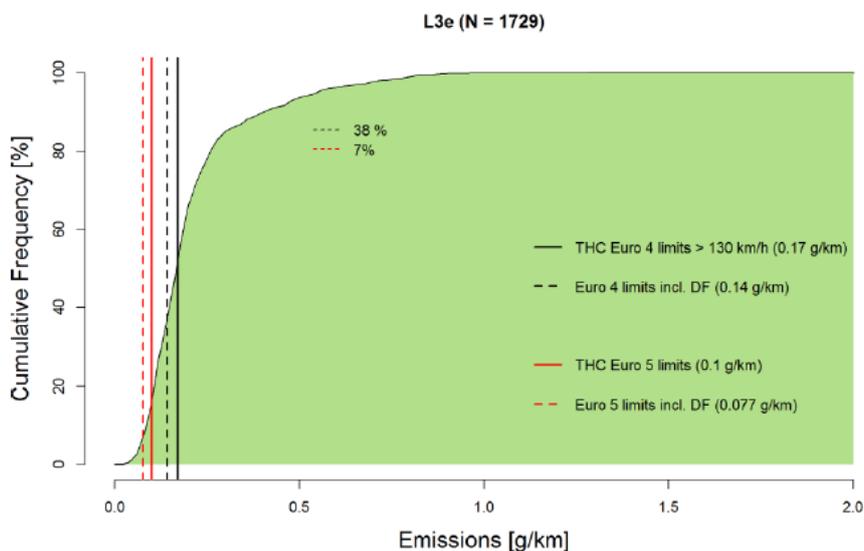


Abbildung 2-6: THC Typ1 Testwerte für L3e Fahrzeuge (PI und PI Hybrid Modelle) [8]

Und nur 14% (235) der Motorräder haben NOx Emissionswerte unter den Euro 5 Grenzwerten, wie in Abbildung 2-7 dargestellt.

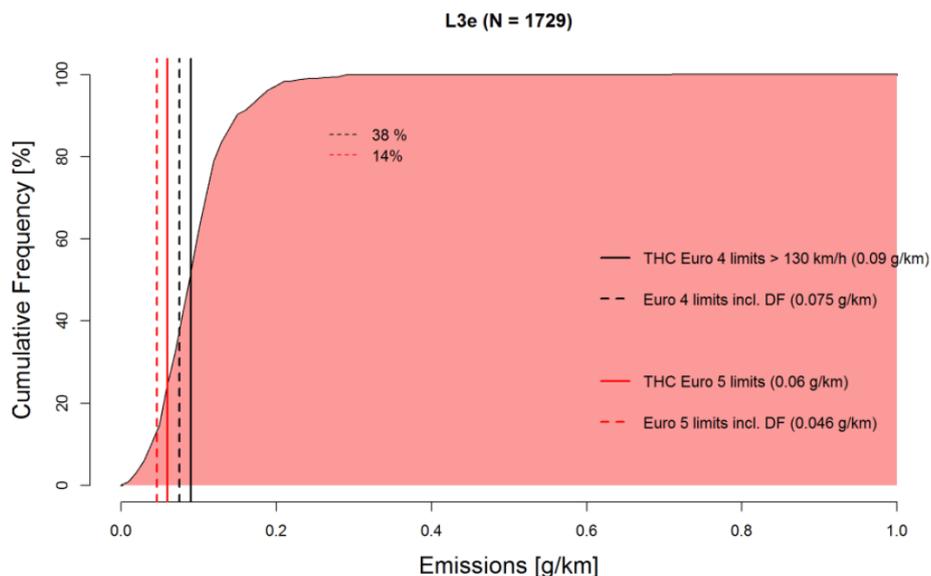


Abbildung 2-7: NOx Typ1 Testwerte für L3e Fahrzeuge (PI und PI Hybrid Modelle) [8]

In der Abbildung 2-7 wurde fälschlicherweise THC statt NOx geschrieben, die Grenzwerte stimmen aber mit jenen für NOx überein, lediglich die Bezeichnung ist falsch.

Tabelle 2-3 zeigt noch einmal zusammengefasst den prozentualen Anteil der mit 2014 auf dem Markt verfügbaren Fahrzeuge, die die Euro 4 bzw. Euro 5 Emissionsgrenzwerte erfüllen. Es werden sowohl für Euro 4, aber besonders für Euro 5 die Emissionen erheblich reduziert werden müssen.

Tabelle 2-3: Zusammenfassung der momentanen Typ1 Testwerte für Kategorie L-Fahrzeuge [8]

Vehicle Category	Number after removal of duplicate models	Euro 4 including DF	Euro 5 including DF
L1e*	257	63%	0%
L3e	1742	8%	1%
L5e	48	7%	4%
L7e	107	0%**	0%

* THC und NOx Typ1 Testergebnisse werden als Summenwert behandelt

** 11% falls NOx Standard nicht berücksichtigt

Nicht nur die Grenzwerte werden mit Euro 5 nochmals verschärft, sondern auch die Gewichtungsfaktoren haben sich teilweise zur Kaltphase hin verschoben. Die anzuwendenden Gewichtungsfaktoren sind Tabelle 2-4 zu entnehmen.

Tabelle 2-4: Gewichtungsfaktoren für Euro 4(links) und Euro 5(rechts) [6]

Fahrzeugklasse	Name der Fahrzeugklasse	Prüfzyklus	Gleichung Nummer	Wichtungsfaktoren	Prüfzyklus	Gleichung	Wichtungsfaktoren
L1e-A	Fahrräder mit Antriebssystem	ECE R47	2-52	$w_1 = 0,30$ $w_2 = 0,70$	WMTC Stufe 3	2-53	$w_1 = 0,50$ $w_2 = 0,50$
L1e-B	Zweirädrige Kleinkrafträder						
L2e	Dreirädrige Kleinkrafträder						
L6e-A	Leichte Straßen-Quads						
L6e-B	Leichte Vierradmobile						
L3e L4e	Zweirädrige Krafträder mit und ohne Beiwagen $v_{max} < 130$ km/h	WMTC, Phase 2	2-53	$w_1 = 0,30$ $w_2 = 0,70$		2-53	$w_1 = 0,50$ $w_2 = 0,50$
L5e-A	Dreirädrige Kraftfahrzeuge $v_{max} < 130$ km/h						
L7e-A	Schwere Straßen-Quads $v_{max} < 130$ km/h						
L3e L4e	Zweirädrige Krafträder mit und ohne Beiwagen $v_{max} \geq 130$ km/h	WMTC, Phase 2	2-54	$w_1 = 0,25$ $w_2 = 0,50$ $w_3 = 0,25$		2-54	$w_1 = 0,25$ $w_2 = 0,50$ $w_3 = 0,25$
L5e-A	Dreirädrige Kraftfahrzeuge $v_{max} \geq 130$ km/h						
L7e-A	Schwere Straßen-Quads $v_{max} \geq 130$ km/h						
L5e-B	Dreirädrige Fahrzeuge zur gewerblichen Nutzung	ECE R40	2-52	$w_1 = 0,30$ $w_2 = 0,70$	2-53	$w_1 = 0,30$ $w_2 = 0,70$	
L7e-B	Schwere Gelände-Quads						
L7e-C	Schwere Vierradmobile						

2.2 Emissionsgrenzwerte Non-Road SI Motoren < 19 kW

Mit dem 1. Januar 2017 ist die Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates in Kraft getreten, „über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG“ ([5]: S.1)

Da der betrachtete Motorenprüfstand auf eine maximale effektive Motorenleistung von 20 [kW] beschränkt ist, sind hier nur die Motoren <19 kW von Interesse.

Dabei werden von der Verordnung (EU) 2016/1628 zwei verschiedene Klassen unterschieden, zum einen **Klasse NRSh**: für „handgehaltene Fremdzündungsmotoren mit einer Bezugsleistung unter 19 kW, die ausschließlich zum Einsatz in handgehaltenen Maschinen und Geräten bestimmt sind“ ([5]: S.14) und zum anderen **Klasse NRS**: für „Fremdzündungsmotoren mit einer Bezugsleistung unter 56 kW, die nicht in der Klasse NRSh inbegriffen sind“ ([5]: S.14). Die Unterklassen beider zuvor genannten Klassen können Tabelle 2-5 entnommen werden.

Tabelle 2-5: Unterklassen der „Non-Road“ Motorklassen NRSh und NRS [5]

Klasse	Art der Zündung	Drehzahl	Leistungsbereich (kW)	Hubraum (cm ³)	Unterkategorie	Bezugsleistung			
NRSh	SI	variabel oder konstant	0 < P < 19	SV < 50	NRSh-v-1a	Höchste Nutzleistung			
				SV ≥ 50	NRSh-v-1b				
Klasse	Art der Zündung	Drehzahl	Leistungsbereich (kW)	Hubraum (cm ³)	Unterkategorie	Bezugsleistung			
NRS	SI	variabel, ≥ 3 600 min ⁻¹ ; oder konstant	0 < P < 19	80 ≤ SV < 225	NRS-vr-1a	Höchste Nutzleistung			
				SV ≥ 225	NRS-vr-1b				
				80 ≤ SV < 225	NRS-vi-1a				
				SV ≥ 225	NRS-vi-1b				
		variabel, < 3 600 min ⁻¹	19 ≤ P < 30	SV ≤ 1 000	NRS-v-2a	Höchste Nutzleistung			
				SV > 1 000	NRS-v-2b				
				variabel oder konstant	30 ≤ P < 56	alle		NRS-v-3	Höchste Nutzleistung

Als Motoren < 19 kW mit SV < 80 cm³ in anderen als handgehaltenen Maschinen und Geräten sind Motoren der Klasse NRSh zu verwenden.

Die Emissionsgrenzwerte für die Klassen NRSh, NRS und deren Unterklassen können Tabelle 2-6 entnommen werden. Das verbindliche Datum der Anwendung dieser Verordnung auf die EU-Typengenehmigung von Motoren der Klasse NRSh und NRS ist der 1. Januar 2018. Für das Inverkehrbringen von Motoren der Klasse NRSh und NRS gilt das Datum vom 1. Januar 2019. [5] Vergleiche Anhang 2: Zeitplan und Prüfzyklen für Non-Road Maschinen.

Tabelle 2-6: Emissionsgrenzwerte für die Klassen NRSh und NRS [5]

Emissionsstufe	Motorenunterklasse	Leistungsbereich	Art der Zündung	CO	HC + NO _x
		kW		g/kWh	g/kWh
Stufe V	NRSh-v-1a	0 < P < 19	SI	805	50
Stufe V	NRSh-v-1b			603	72
Emissionsstufe	Motorenunterklasse	Leistungsbereich	Art der Zündung	CO	HC + NO _x
		kW		g/kWh	g/kWh
Stufe V	NRS-vr-1a NRS-vi-1a	0 < P < 19	SI	610	10
Stufe V	NRS-vr-1b NRS-vi-1b			610	8
Stufe V	NRS-v-2a	19 ≤ P ≤ 30		610	8
Stufe V	NRS-v-2b NRS-v-3	19 ≤ P < 56		4,40 (*)	2,70 (*)

(*) Wahlweise stattdessen auch jede Kombination von Werten, die die Gleichung $(HC+NO_x) \times CO^{0,784} \leq 8,57$ sowie die folgenden Bedingungen: $CO \leq 20,6$ g/kWh und $(HC + NO_x) \leq 2,7$ g/kWh erfüllen

2.3 Verdünnungssystem

Die wichtigsten Anforderungen an das Abgasverdünnungssystem sind in der Anlage 4 der Verordnung (EU) Nr. 134/2014 beschrieben und lassen sich im Wesentlichen auf die folgenden Aussagen reduzieren.

*„Es ist ein **Vollstrom-Abgasverdünnungssystem** zu verwenden [...]. Das **Gesamtvolumen** des Gemisches aus Abgasen und Verdünnungsluft **muss gemessen** und eine **kontinuierlich proportionale Probe** dieses Volumens für die Analyse aufgefangen werden“ ([2]: S.66)*

Alle in weiterer Folge genannten Anforderungen und Anlagenkomponenten dienen der Erfüllung dieser Aussagen.

Im Wesentlichen besteht das System aus:

- Verbindungsrohr (TT)
- Mischkammer (MC)
- Verdünnungstunnel (DT)
- Verdünnungsluft Konditioniereinrichtung (DAF)
- Hauptdurchsatzpumpe
- Durchsatzmesseinrichtung

1) Verbindungsrohr (TT) ([2]: Anlage 4, 1.3.1.)

Die wichtigsten Anforderungen an das Verbindungsrohr vom Fahrzeug-Auspuff an die CVS-Anlage sind in der Anlage 4, 1.3.1 zusammengefasst:

- Die Länge des Verbindungsrohres muss $< 3,6\text{m}$ sein, wenn es wärmeisoliert ist $< 6,1\text{m}$
- Innendurchmesser höchstens 105mm
- Der statische Druck am Auspuffende darf um nicht mehr als 12,5mbar (2,5mbar) gegenüber dem Betrieb ohne Anschluss an das Verbindungsrohr (CVS) schwanken
- Die Druckmessung muss im Auspuffendrohr oder in einer Verlängerung mit gleichen Durchmesser erfolgen
- Material darf Abgaszusammensetzung nicht verändern
- Wärmeverluste möglichst gering
- Elastomerverbinder müssen möglichst wärmebeständig sein
- Mehrere Endrohre möglichst fahrzeugnahe miteinander verbinden

Generell sollten alle Verbindungsleitungen, sowohl vom Auspuff zum Verdünnungstunnel als auch von den Probenahmesonden zu den Analysatoren oder Beuteln, möglichst kurz ausgeführt werden. 90 ° Bögen und Kreuzstücke sollten vermieden werden. Bögen sollen auf ein Minimum reduziert und Radien benötigter Bögen maximiert werden.[14]

2) Mischkammer (MC) ([2]: Anlage 4, 1.3.3.)

- Es kann eine Mischblende verwendet werden
- Druck an Mischstelle darf um nicht mehr als +/-2,5mbar vom Luftdruck abweichen, um Auswirkungen auf die Bedingungen am Auspuffendrohr gering zu halten (begrenzt Druckabfall im DAF)
- Um die geringe Druckabweichung vom Luftdruck einhalten zu können, kann ein zusätzliches sog. Booster-Gebläse verwendet werden. ([14]: S.584)

3) Verdünnungstunnel (DT) ([2]: Anlage 4, 1.3.3.)

- An Anbringungsstellen für Probenahmesonden muss ein homogenes Gemisch vorliegen, über Querschnitt +/-2% vom Durchschnitt der Werte (gemessen wird an 5 gleichmäßig über den Durchmesser des Gasstroms verteilten Stellen)

Für die Partikelprobennahme gilt für den DT:

- Gerades Rohr aus elektrisch leitendem Material und geerdet
- $Re \geq 4000$
- Durchmesser $\geq 200\text{mm}$
- Position der Probenahmesonde 10-20 Tunneldurchmesser stromabwärts vom Abgaseintritt (\rightarrow min 2m)
- Kann isoliert sein

4) Verdünnungsluft Konditioniereinrichtung (DAF) ([2]: Anlage 4, 1.3.2.)

Ist nicht verpflichtend, wird aber dringend empfohlen, um die Hintergrundkonzentration sowohl von HC, wie auch von Partikeln zu verringern. Zusätzlich kann die Verdünnungsluft beheizt und/oder getrocknet werden, um ein Kondensationsrisiko im Verdünnungssystem und den Probenahmeleitungen zu verringern. Beim offenen System nicht anwendbar.

- Aktivkohlefilter (wegen HC Hintergrundkonzentration)
- Grobpartikelfilter
- HEPA-Filter Klasse H13 (nach Norm EN 1822:1998)
- Druckabfall max. 2,5mbar (250Pa)

5) Hauptdurchsatzpumpe ([2]: Anlage 4, 1.3.4.)

Muss ausreichend Durchsatz gewährleisten, um das gesamte Abgas aufzufangen (bei offener Anlage) und um Kondensation zu vermeiden. Das Kondensationsrisiko ist auch abhängig von der Verdünnungsluftkonditionierung und der Beheizung der Anlage.

In der Regel ist dies aber erfüllt wenn:

- Der Strom des verdünnten Abgases dem doppelten des maximalen Rohabgasstromes bei Beschleunigungsphasen entspricht ([14]: §1065.140), oder
- Die CO₂-Konzentration in den Beutel auf einem Wert von < 3Vol% gehalten wird (gilt für Otto- und Dieseldieselkraftstoff)

Dies entspricht etwa einem mittleren Verdünnungsfaktor zwischen 5 und 7 über die gesamte Testphase ([14]: §1065.140). Der Hauptgrund Kondensatbildung zu vermeiden liegt darin, aufgrund von Volumenabnahme die Konzentration der Abgaskomponenten nicht zu verändern und die Proportionalität des Probenstroms zum Gesamtdurchsatz aufrecht zu erhalten. Besonders kritisch ist dies im Probenahmesystem, in den Abgasbeuteln und im Messsystem. In diesen darf sich nach [2]: Anlage 4, 1.2.1 kein Kondensat bilden.

Die amerikanische Verordnung geht hierbei noch einen Schritt weiter und fordert eine ausreichende Verdünnung der Abgase, um Wasserkondensation im Verdünnungs- und Probenahmesystem zu vermeiden. ([1]: §86.509-90)

6) Durchsatzmesseinrichtung ([2]: Anlage 4, 1.3.5.)

- Messgenauigkeit unter allen Betriebsbedingungen +/-2%
- Können Temperaturschwankungen des Gerätes nicht ausgeglichen werden, muss ein Wärmetauscher verwendet werden um die Temperatur auf +/-6K der vorgesehenen Betriebstemperatur zu halten
- Zum Schutz der Messeinrichtung können z.B. Zyklonabscheider oder Grobpartikelfilter verwendet werden
- Temperaturfühler unmittelbar vor Volumenmessgerät (Präzision +/-1K, Ansprechzeit 0,1s bei 62% einer geg. Temperaturveränderung)
- Druckmessung vor (und hinter) Volumenmessgerät (Präzision +/-0,4kPa)
- Passiv: Kombination aus Wärmetauscher und CFV oder PDP
- Aktiv: Messdaten (Druck und Temperatur) müssen laufend erfasst und der Durchsatz berechnet werden

Im Folgenden sollen Verdünnungssysteme mit verschiedenen Durchsatzmesseinrichtungen vorgestellt und deren Systemmerkmale herausgearbeitet werden.

„Da mit unterschiedlichen Versuchsanordnungen genaue Ergebnisse erzielt werden können, braucht die Anlage diesen Abbildungen nicht in allen Einzelheiten zu entsprechen. Es können zusätzliche Teile wie Instrumente, Ventile, Magnetventile und Schalter verwendet werden, um zusätzliche Daten zu erhalten und die Funktionen der einzelnen Teile der Anlage zu koordinieren.“ ([2]: S.68)

2.3.1 Verdrängerpumpe (PDP-CVS)

Mithilfe einer Verdrängerpumpe (PDP=positiv displacement pump), einem Wärmetauscher für eine konstante Temperatur sowie einem konstanten Druck vor der Pumpe wird ein konstantes Volumen (bezogen auf Normbedingungen) durch die CVS-Anlage befördert. Durch Zählen der Umdrehungen der kalibrierten Verdrängerpumpe kann das Gesamtvolumen ermittelt/gemessen werden. Siehe Abbildung 2-8.

- Dabei kann die Pumpe über eine Reihe fester Drehzahlen verfügen. ([2]: Anhang 2, Anl. 4, 1.3.4.)
- Sind bei einer Pumpe einer CVS-Anlage mehrere Antriebsdrehzahlen vorgesehen, muss für jeden verwendeten Drehzahlbereich eine Kalibrierung vorgenommen werden. ([2]: Anhang 2, Anl. 4, 2.2.1.)

„Die proportionale Probe erhält man durch Entnahme bei konstantem Durchsatz mit einer Pumpe, einem Durchsatzmesser und einem Durchsatzregler.“ ([2]: Anhang 2, Anl. 4, 1.4.1.)

„Wird durch ein Teil des Systems (Wärmetauscher, Zyklonabscheider, Gebläse usw.) die Konzentration eines beliebigen Schadstoffs in den verdünnten Abgasen verändert und kann der Fehler nicht behoben werden, dann muss die Probe dieses Schadstoffs vor diesem Teil entnommen werden.“ ([2]: Anhang 2, Anl. 4, 1.2.4.)

Ein solches System ist in Abbildung 2-8 skizziert. Die Probenentnahme vor dem Wärmetauscher hat jedoch den Nachteil, dass Temperaturschwankungen aufgrund von momentan unterschiedlichen Verdünnungen z.B. durch Beschleunigungs- oder Leerlaufphasen auftreten können. Diese Temperaturschwankungen müssen ausgeglichen werden, um einen proportionalen Probenstrom zu gewährleisten. Bei Verwendung eines Wärmetauschers wie in Abbildung 2-9, wäre für die Probenahme gasförmiger Emissionen die Entnahmestelle bevorzugt hinter dem Wärmetauscher anzuordnen, vorausgesetzt die Konzentrationszusammensetzung des Abgases wird dadurch nicht verändert. Da die Probenahme somit bei gleicher Temperatur und gleichem Druck geschieht, wie das durch die Verdrängerpumpe strömende verdünnte Abgas, ist bei konstantem Probenstrom, dieser auch proportional.

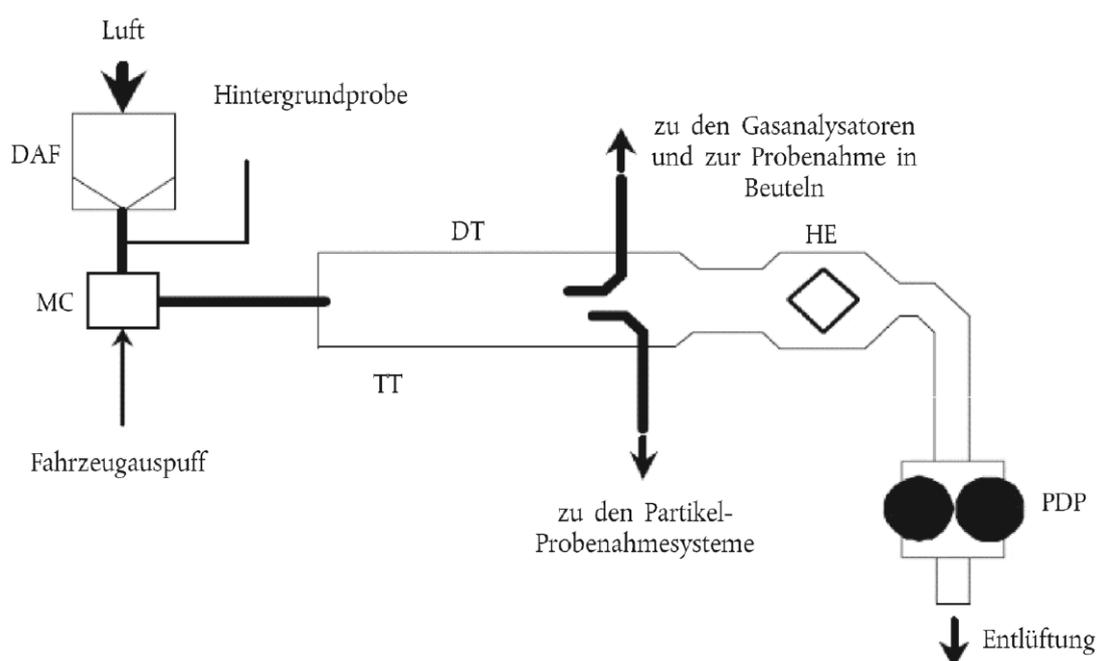


Abbildung 2-8: Verdünnungssystem mit Verdrängerpumpe nach EU 134/2014 [2]

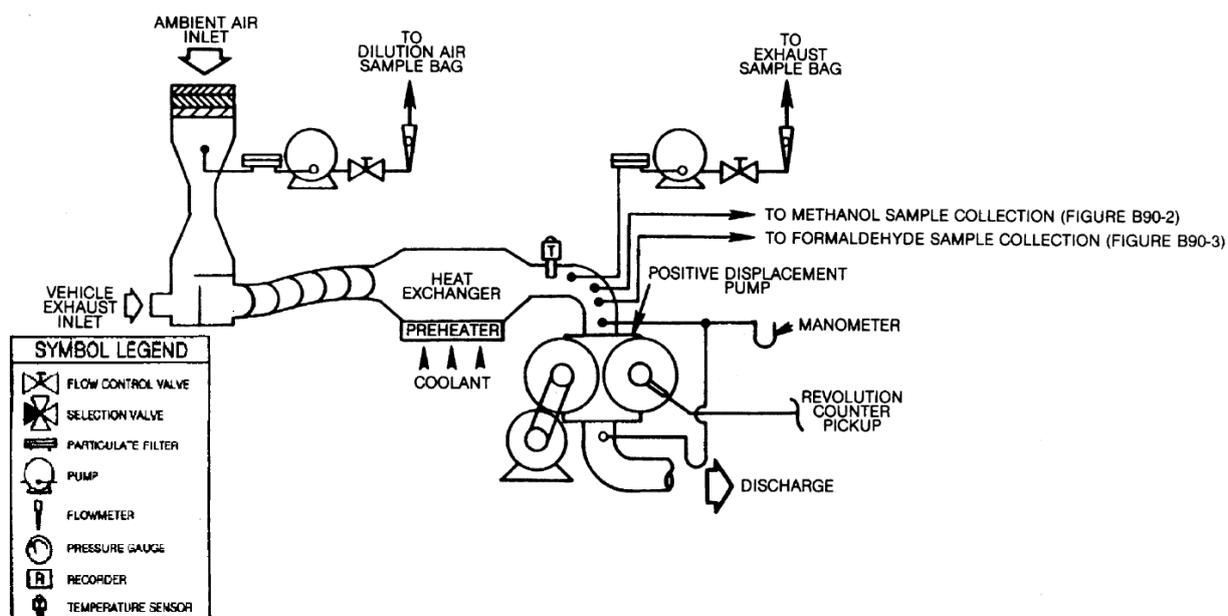


Abbildung 2-9: Verdünnungssystem mit Verdrängerpumpe nach US-EPA-CFR-40-part86 [1]

2.3.2 Kritisch durchströmtes Venturirohr (CFV-CVS)

Eine weitere Möglichkeit der Durchsatzmeseinrichtung stellt das kritisch durchströmte Venturirohr (CFV=critical flow venturi) dar, skizziert in Abbildung 2-10. Dieses System wird in den meisten Literaturen empfohlen und auch von allen namenhaften CVS-Anlagenherstellern verwendet. Dabei wird durch ein Gebläse/Pumpe ein ausreichendes Druckgefälle über ein Venturirohr erzeugt, so dass sich eine kritische Strömung einstellt. Der Durchfluss durch das Venturirohr erfolgt dabei im engsten Querschnitt mit Schallgeschwindigkeit. Nach der Formel (2-1) ist die Geschwindigkeit *direktproportional* der Quadratwurzel der Gasttemperatur.

$$c = \sqrt{\kappa \frac{\rho}{p}} = \sqrt{\kappa R T} \quad (2-1)$$

Der Durchsatz durch das Venturirohr (bezogen auf Normbedingungen), hängt somit nur vom Druck und der Temperatur vor dem Venturirohr ab. Formel (2-2) zeigt die Durchsatzgleichung für ein kritisch durchströmtes Venturirohr.

$$Q_N = K_v * \frac{p_v}{\sqrt{T_v}} \quad (2-2)$$

K_v = Kalibrierkoeffizient

Zur Bestimmung des Gesamtdurchsatzes durch das Venturirohr werden Druck und Temperatur am Eintritt während der gesamten Prüfung kontinuierlich überwacht, der momentane Durchsatz berechnet und integriert. Durch die Verwendung weiterer Venturirohre/Venturidüsen (sampling venturi) für die Probenahme kann ein proportionaler Probenstrom sichergestellt werden, da Druck und Temperatur beim Eintritt in beide Venturirohre/Venturidüsen gleich sind. Es wäre in diesem Sonderfall keine elektronische Durchflusskompensation erforderlich. [2]

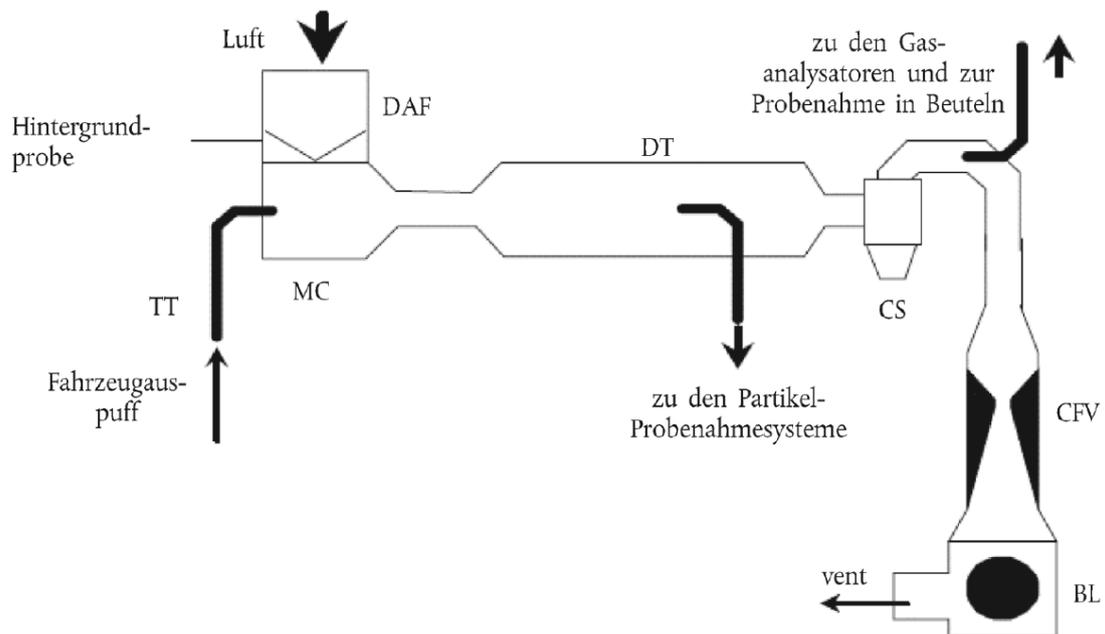


Abbildung 2-10: Verdünnungssystem mit kritisch durchströmtem Venturirohr [2]

Um den Volumenstrom durch die CVS-Anlage an unterschiedliche Fahrzeuge anpassen zu können und einen optimalen Verdünnungsgrad zu erreichen, können mehrere Venturirohre unterschiedlicher Größe parallelgeschaltet werden. Je nach gewünschtem Gesamtvolumenstrom werden nur die entsprechend benötigten Venturirohre über Ventile freigegeben.

2.3.3 Elektronische Durchflusskompensation (EFC-CVS)

Diese Möglichkeit wird in der Verordnung (EU) 134/2014 nicht direkt erwähnt. Lediglich indirekt lassen folgende Aussagen eine Zulässigkeit dieser Mess- bzw. Regelmethode vermuten.

„Ist ein Ausgleich der Durchsatzschwankungen nicht möglich, dann sind ein Wärmetauscher und ein Temperaturregler nach der Anlage 4 zu verwenden, damit ein konstanter Durchsatz durch das System und damit die Proportionalität des Durchsatzes der Probe sichergestellt ist.“ ([2]: Anhang 2, 4.5.3.12.1.2.6.)

„In den Abbildungen Ap 4-1 und Ap 4-2 sind zwei Arten von empfohlenen Abgasverdünnungssystemen, die den Vorschriften dieses Anhangs entsprechen, schematisch dargestellt. Da mit unterschiedlichen Versuchsanordnungen genaue Ergebnisse erzielt werden können, braucht die Anlage diesen Abbildungen nicht in allen Einzelheiten zu entsprechen. Es können zusätzliche Teile wie Instrumente, Ventile, Magnetventile und Schalter verwendet werden, um zusätzliche Daten zu erhalten und die Funktionen der einzelnen Teile der Anlage zu koordinieren.“ ([2]: Anhang 2, Anl. 4, 1.4.)

„Volumenmessung beim Vorverdünnungssystem

Bei dem Verfahren zur Messung des Gesamtvolumens des verdünnten Abgases, das bei der CVS-Anlage angewandt wird, muss die Messgenauigkeit unter allen Betriebsbedingungen $\pm 2\%$ betragen. Kann das Gerät Temperaturschwankungen des Gemisches aus Abgasen und Verdünnungsluft am Messpunkt nicht ausgleichen, dann muss ein Wärmetauscher verwendet werden, um die Temperatur mit einer Toleranz von $\pm 6\text{ K}$ auf der vorgesehenen Betriebstemperatur zu halten.“ ([2]: Anhang 2, Anl. 4, 1.3.5.)

Eine genauere Beschreibung dieser Anlage ist in der Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates [9] zu finden. Die Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG. Diese wurde mit dem 1. Januar 2017 von der Verordnung (EU) 2016/1628 mit Artikel 64 aufgehoben.[5] Da die Verordnung (EU) 2016/1628 jedoch noch nicht zur Gänze ausgearbeitet ist, wird hier auf die vorangegangene Verordnung Bezug genommen. Es ist zu erwarten, dass sich die beiden hinsichtlich der technischen Anforderungen an die CVS- Anlage nicht wesentlich unterscheiden werden.

„EFC: Elektronische Durchflusskompensation (bei Anwendung eines HE wahlfrei). Wird die Temperatur an der Einlassöffnung der PDP oder des CFV oder der SSV nicht konstant gehalten, ist zum Zweck einer kontinuierlichen Messung der Durchflussmenge und zur Regelung der verhältnisgleichen Probenahme im Partikelsystem ein elektronisches Durchflusskompensations-System erforderlich. Daher werden die Signale des kontinuierlich gemessenen Durchsatzes verwendet, um den Probendurchsatz durch die Partikelfilter des Partikel-Probenahmesystems entsprechend zu korrigieren.“ ([9]: Anhang 2, 1.2.1.2.)

Die obige Beschreibung gilt in selber Weise auch für Gasprobenentnahmesysteme. Die Abbildung 2-11 zeigt Kombinations- und Regelmöglichkeiten der zuvor beschriebenen Systeme PDP-CVS und CFV-CVS.

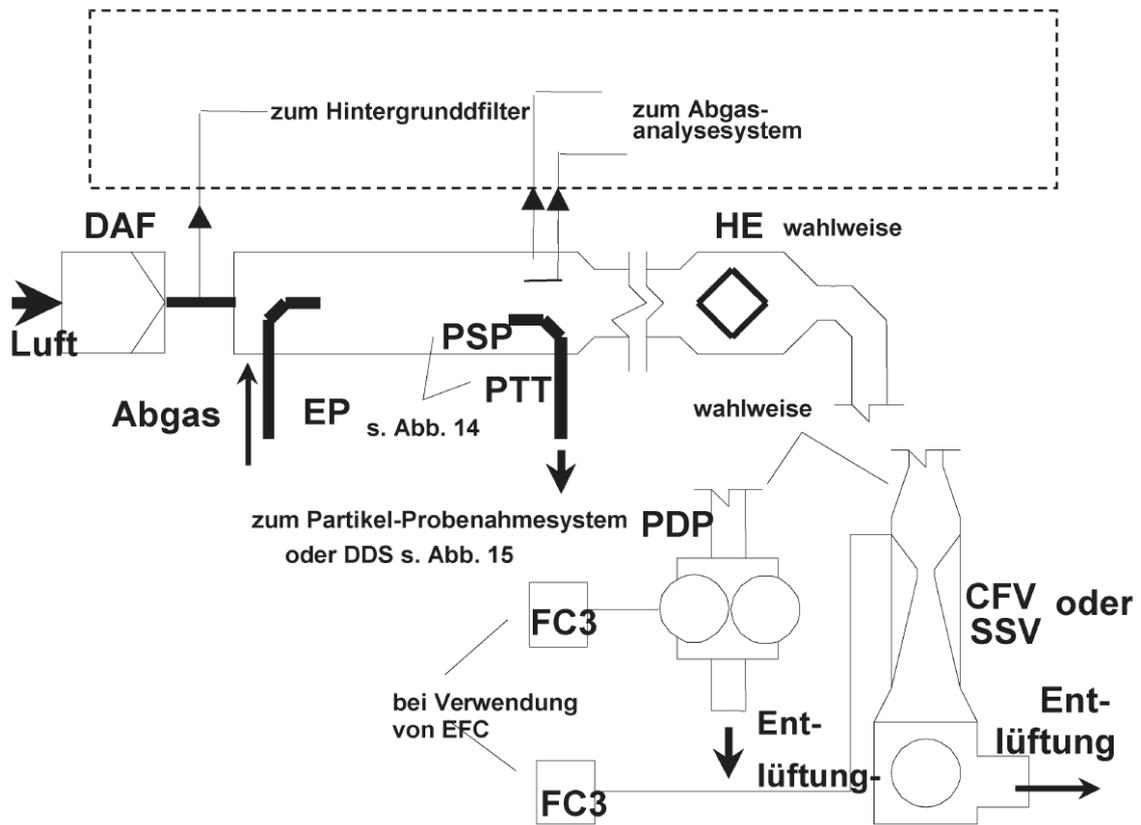


Abbildung 2-11: Vollstrom Verdünnungssystem [9]

2.3.4 Offenes System

Die Verwendung einer offenen CVS-Anlage, wie in Abbildung 2-12 dargestellt, ist nach wie vor zulässig. Die meisten namenhaften Hersteller von CVS-Anlagen (AVL, Horiba) verwenden jedoch geschlossene Anlagen in Kombination mit einem CFV. Auch das Joint Research Centre (JRC), das die Vor- und Effekt-Studien über die Euro 4 und Euro 5 Verordnungen für die Europäische Kommission durchgeführt hat, hat ausschließlich mit geschlossenen Anlagen getestet. Rückfragen beim JRC über die Einhaltung der geforderten maximalen Druckschwankungen am Auspuffende und die Auswirkungen auf Kleinmotoren (insbesondere 2-Taktern) bei Verwendung einer geschlossenen Anlage hat keine quantitativen Ergebnisse erbracht. Die Erfahrungen des JRC mit geschlossener CVS-Anlage seien durchwegs positiv, bei Tests von kleinen 2-Takt-Motoren wird dem Auspuff ein zusätzlicher Zyklonabscheider nachgeschaltet, um die Verunreinigung der Anlage durch größere Öltröpfen zu vermeiden. Dies hat den Nebeneffekt, dass das Zyklonvolumen den von der CVS erzeugten Unterdruck minimiert. [26]

Laut EU Verordnung 134/2014 gilt:

„Ein offenes System kann verwendet werden, wenn nachgewiesen wird, dass alle Abgase aufgefangen werden.“ ([2]:Anhang 2, 4.5.3.1.)

„Eine Sonde ist in der Nähe, aber außerhalb der Abgasauffangeinrichtung anzubringen, um Proben der während der gesamten Prüfung mit konstantem Durchsatz durch eine Pumpe, einen Filter und einen Durchsatzmesser strömenden Verdünnungsluft zu nehmen.“ ([2]: Anhang 2, 4.5.3.7.)

Die Anbringung der Probenahmesonde für Verdünnungsluft in der Nähe des Auffangtrichters hat den Vorteil, dass die Konzentration der Verdünnungsluft bei Betrieb der CVS-Anlage und bei ruhender Anlage verglichen werden können. Sind diese beiden identisch, so ist das ein Nachweis dafür, dass das gesamte Abgas aufgefangen wurde. Aufgrund sich ändernder Abgasmassenströme und Strömungsverhältnisse am Auffangtrichter bei einem Fahrzeugwechsel, sollte dieser Nachweis für jede Prüfung erbracht werden.

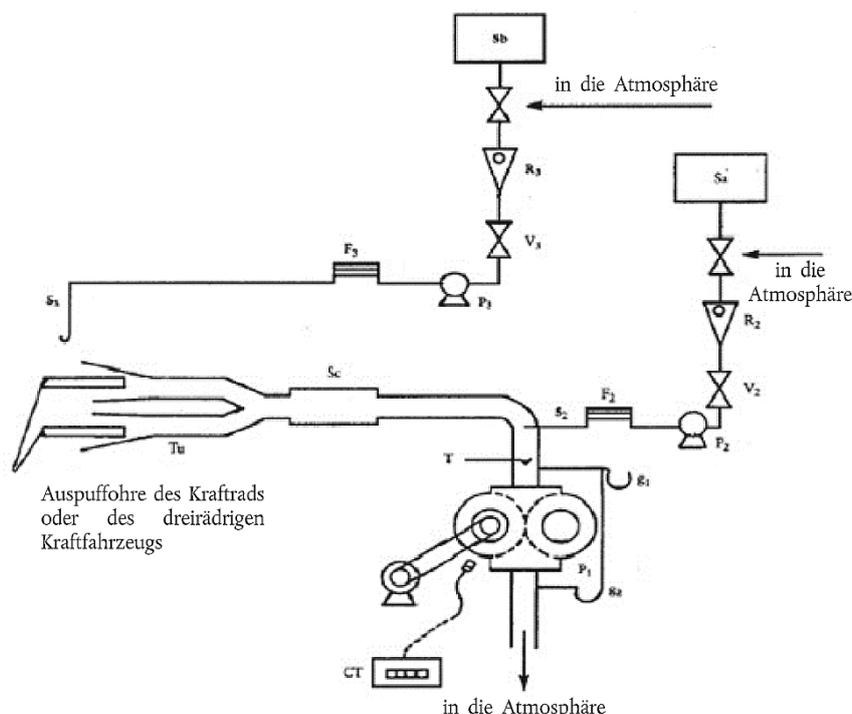


Abbildung 2-12: Offenes Verdünnungssystem [2]

Die nachfolgende Tabelle 2-7 soll eine Zusammenfassung über die Vor- und Nachteile einer offenen bzw. geschlossenen CVS-Anlage geben.

Tabelle 2-7: CVS offen vs. geschlossen

offen	geschlossen
Nachteile	
höherer DF, damit 100% aufgefangen wird	Mischstelle weiter entfernt
Nachweis, dass 100% aufgefangen wird	Erzeugt Unterdruck in der Auspuffanlage
Konditionierung der Verdünnungsluft nicht möglich	TT Dimensionierung für verschiedene Motorgrößen/Abgasströme anpassen, damit Δp klein und Totzeit klein ist
Partikel durch Bremsen- oder Reifenabrieb können miteingesaugt werden Kann PM/PN Messung beeinflussen	Aufwändiger Anschluss vom Auspuff an TT
	Keine konstante Totzeitverschiebung im TT → Richtige modale Zuordnung schwieriger/aufwendiger
Vorteile	
Konstante und geringere Totzeit bis zu den Analysatoren	Geringerer DF möglich → Beutelkonzentrationen steigen
Anschluss an die CVS Anlage → Keine Auspuffmodifikationen nötig	Konditionierung der Verdünnungsluft → Hintergrundkonzentrationen verringern → Beutelkonzentrationsverhältnis steigt → Messfehler sinkt → Beheizung, Trocknung → geringerer DF möglich
Dem tatsächlichen Betrieb am ähnlichsten	

Die immer geringer werdenden Emissionsgrenzen erfordern einen ebenfalls immer geringer werdenden Verdünnungsgrad, um die Konzentrationen in den Beuteln zu erhöhen und so Messfehler/Messunsicherheiten zu minimieren. Der geringere Verdünnungsgrad erfordert seinerseits größere Aufmerksamkeit hinsichtlich Wasserkondensation. Leitungen müssen beheizt und die Verdünnungsluft unter Umständen konditioniert, sprich beheizt und/oder getrocknet werden können.[12] Die Bereinigung der Hintergrundkonzentration (HC) in der Verdünnungsluft durch Aktivkohlefilter hat zum einen den Vorteil, dass sich der systematische Fehler des DF verringert und zum anderen, dass sich das Verhältnis der Konzentrationen zwischen Abgasbeutel und Verdünnungsluftbeutel vergrößert, was sich wiederum positiv auf den Messfehler auswirkt. [10][11]

Da bei einem offenen System die Verdünnungsluft nicht gefiltert und konditioniert werden kann, erhöht dies den Fehler in der Analyse der Messdaten.[10] Dazu kommt die Problematik, dass der

Gesamtvolumenstrom durch die CVS-Anlage, verhältnismäßig zum Abgasvolumenstrom hoch gehalten werden muss, um sicher zu gehen, dass alle Abgase aufgefangen werden. Dies bedeutet zwangsweise aber auch einen höheren Verdünnungsgrad als bei geschlossenen Anlagen.

Da Fahrzeuge mit Vergasern und Sekundärluftsystemen empfindlich auf Abgasgedruck Änderungen/Schwankungen reagieren, wird bei diesen bevorzugt das offene System verwendet. Die Größe der auftretenden Druckschwankungen und Abgasgedruckänderungen bei einer geschlossenen Anlage und der Einfluss auf den Motorbetrieb bzw. die Abgasnachbehandlung müssen genauer betrachtet werden. Aus diesem Grund wurden im Laufe dieser Arbeit Versuche mit einer offenen und geschlossenen Anlage durchgeführt, mehr dazu im Kapitel 3.7 „Vergleichsmessung an der CVS-Anlage“. Eine andere Untersuchung von Nanopartikel Emissionen von Zweiradfahrzeugen mit 50ccm Zweitaktmotoren bei offener und geschlossener CVS-Anlage von Czerwinski J. et.al. aus dem Jahre 2013 ist zu folgendem Schluss gekommen:

“The tailpipe sampling for NP measurement would be independent of whether “open” or “closed” is used downstream for the measurement of gaseous emissions. The authors recommend the “closed” variant, according to the prevalent legislated procedures.” [18]

Eine weitere Problematik des offenen Systems tritt bei der Partikelmessung auf und wird im Kapitel 2.5 Probenahmesystem für Partikelmasse (PM) erläutert.

2.4 Gasprobenahmesysteme

In der Verordnung 134/2014 wird die Gasprobenentnahme kaum behandelt, die Partikelprobenentnahme aufgrund ihrer Neuheit bei 2 Rädern hingegen sehr ausführlich. Wie in Abbildung 2-13 ersichtlich, ist das Gasprobenentnahmesystem in eine Probenentnahme für modale Messdaten (d.h. zeitlich aufgelöste Messdaten, kontinuierliche Messung) und eine für die Beutel Befüllung (3) zu unterscheiden. Die modale Messung wiederum kann prinzipiell für verdünntes Abgas (2) oder Rohabgas (1) erfolgen. Die Emissionsmessung aus dem Rohabgas ist jedoch für die Typengenehmigung nach Verordnung EU Nr. 134/2014 nicht zulässig und wird in weiterer Folge nicht behandelt.

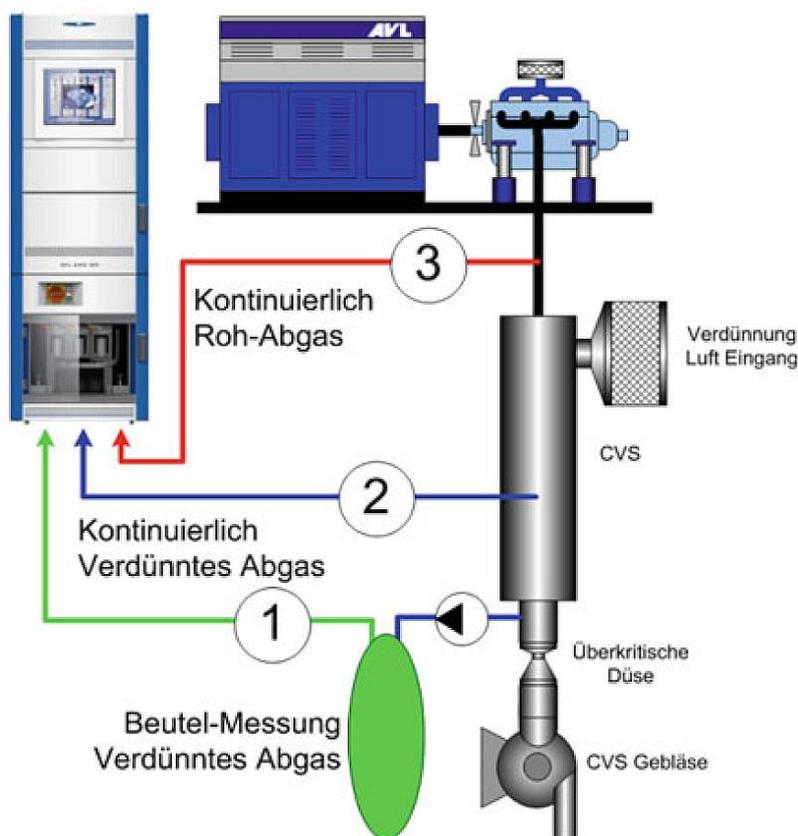


Abbildung 2-13: Mögliche Probeentnahmestellen zur Bestimmung gasförmiger Emissionen [3]

In den zutreffenden Verordnungen werden für die verschiedenen Fahrzeuge und Treibstoffe unterschiedliche Anforderungen an das Gasprobenahmesystem gestellt. Die wichtigsten Aussagen werden im Folgenden als Auszüge gesammelt aufgelistet, um einen Überblick über die verschiedenen Ausführungsvarianten und Anforderungen zu geben.

Fahrzeuge der Kategorie-L nach EU Nr. 134/2014:

Das Gasprobenahmesystem, wie beispielsweise in Abbildung 2-12 dargestellt, besteht grundsätzlich aus folgenden Komponenten:

- Probenahmesonde
- Transferleitung zu den Analysatoren
- Pumpe
- Filter (zum Schutz der Analysatoren, nur Partikel < 5µm)
- Volumenstrommess- und Volumenstromregelgerät

Die EU Verordnung 134/2014 ist hinsichtlich der Angabe der Volumenströme für die Probenahme nicht ganz eindeutig. Aufgrund der Erwähnung der Analyseeinheit FID, kann aber davon ausgegangen werden, dass bei den letzteren Angaben die modale Messung bzw. die Beutelanalyse gemeint ist.

„Mithilfe einer oberhalb der Verdrängerpumpe und gegen die Strömungsrichtung angebrachten Probenahmesonde im verdünnten Abgasstrom sind Proben des während der gesamten Prüfung mit konstantem Durchsatz durch eine Pumpe, einen Filter und einen Durchsatzmesser strömenden verdünnten Abgasgemisches zu nehmen. Der in Abbildung 1-2 [hier Abbildung 2-12] dargestellte und unter Nummer 4.5.3.7 beschriebene Mindestdurchsatz des Probenstroms in den Probenahmeeinrichtungen muss 150 Liter/Stunde [=2,5 l/min] betragen.“ ([2]: 4.5.3.8)

„Für jede Prüfung sind folgende Maßnahmen zu treffen: [...]

e) die Durchsätze der Proben sind auf den gewünschten Wert und die Messgeräte für den Gasdurchsatz auf null zu stellen;

bei Beutelp Proben von Gasen (außer Kohlenwasserstoffen) beträgt der Mindestdurchsatz 0,08 Liter/Sekunde; [=4,8 l/min]

bei Kohlenwasserstoffproben beträgt der Mindestdurchsatz für den Nachweis mit Flammenionisierungsdetektoren (FID) (oder mit beheizten Flammenionisierungsdetektoren, falls das Fahrzeug mit Methanol betrieben wird) 0,031 Liter/Sekunde; [=1,86 l/min]“ ([2]: 5.2.7.2)

Emissionsregulierung für Motorräder nach EPA CFR 40 Part 86 Subpart F

“For methanol-fueled motorcycles, the samples lines for the methanol and formaldehyde samples are heated to prevent condensation. The temperature of the sample lines shall be more than 20 °F (11 °C) above the maximum dew point of the sample, but below 121 °C (250 °F).

*(4) The location of the dilution air inlet shall be placed so as to use testcell air for dilution and the flow capacity of the CVS shall be large enough to completely eliminate water condensation in the **dilution and sampling systems**.*

(iii) The dilution ratio is sufficiently high to prevent condensation in bag samples as they cool to room temperature.

(1) The ratio of the CVS flow rate to the sample flow rate shall not deviate from the ratio at the start of the test by more than ±5 percent. (The volumetric sample flow rate shall be varied inversely with the square root of the bulk stream temperature.)” ([1]: § 86.509-90)

(d) CVS system verification. The following “gravimetric” technique can be used to verify that the CVS and analytical instruments can accurately measure a mass of gas that has been injected into the system.

(7) The cause for any discrepancy greater than ±2 percent must be found and corrected. ([1]: § 86.519-90)

Der betrachtete Motorenprüfstand wird momentan nicht für Typengenehmigungen verwendet, sondern ausschließlich für Forschungszwecke. Die Anforderungen in den Verordnungen für Non-Road Motoren sind daher nicht zwangsläufig zu erfüllen. Dennoch werden sie hier mitangeführt, um die Besonderheiten und Eigenheiten der Gasprobenahmesysteme zu verdeutlichen.

Nicht für den Straßenverkehr zugelassene SI-Motoren mit einer Leistung kleiner 19 kW nach EPA CFR 40 Part 90

Diese Verordnung ist nicht mehr oder nur in Sonderfällen zutreffend. Seit 2010 gilt für die amerikanische Typenzulassung kleiner Non-Road Motoren die Verordnung EPA CFR 40 Part 1054, die im Anschluss behandelt wird. Auszüge der bis vor kurzem geltenden Verordnung werden hier zur Verdeutlichung dennoch angeführt.

“Grab sampling for individual modes is an acceptable method of dilute testing for all constituents, HC, NOx, CO, and CO₂. Continuous dilute sampling is not required for any of the exhaust constituents, but is allowable for all. Heated sampling is not required for any of the constituents, but is allowable for HC and NOx. The mass of gaseous emissions is determined from the sample concentration and total flow over the test period” ([15]:§90.42)

“The sample probe for continuously intergrated NOx, CO, and CO₂ must be in the same plane as the continuous HC probe, but sufficiently distant (radially) from other probes and the tunnel wall so as to be free from the influences of any wakes or eddies.” ([15]: §90.421)

“No other analyzers may draw a sample from the continuous HC sample probe, line, or system, unless a common sample pump is used for all analyzers and the sample line system design reflects good engineering practice.” ([15]: §90.421)

Abbildung 2-14 zeigt ein Probenahmesystem sowohl für eine Beutelprobenahme, als auch eine Probennahe für kontinuierliche Messung.

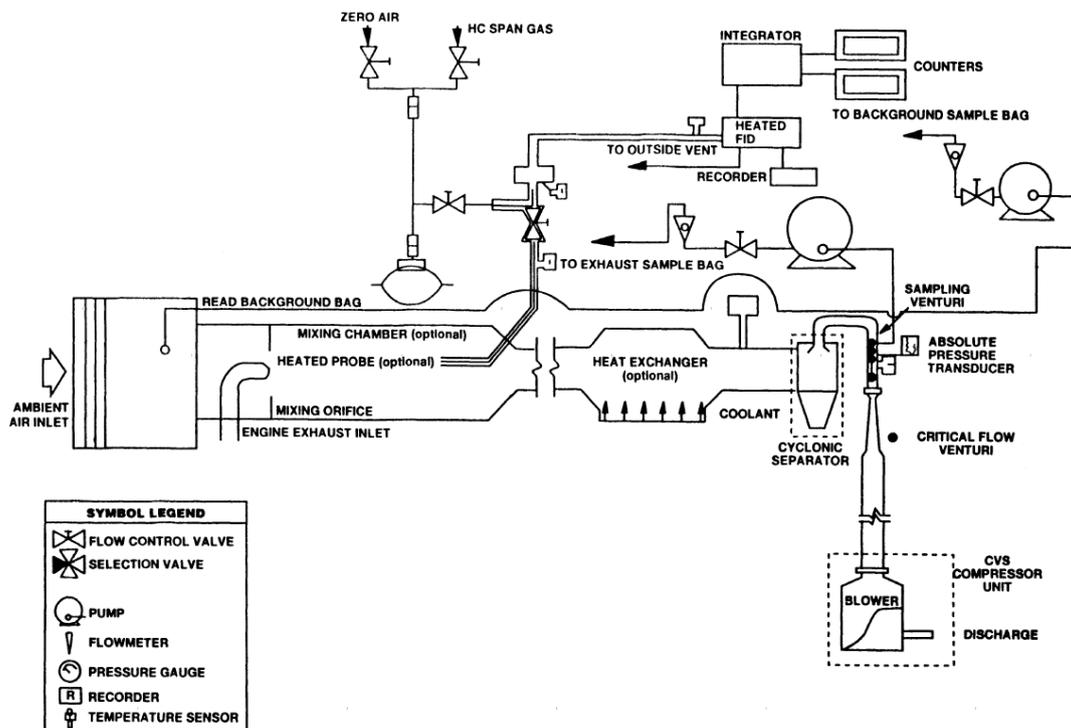


Abbildung 2-14: Probenahmesystem für gasförmige Emissionen nach EPA-40-CFR-Part90 Non-Road SI < 19kW [15]

“The continuous HC sampling system consists of a probe (which for a HFID analyzer must raise the sample to the specified temperature) and, where used, a sample transfer system (which for a HFID must maintain the specified temperature). The HFID continuous hydrocarbon sampling system (exclusive of the probe) must:

(B) Have a wall temperature of 190 ± 11 °C over its entire length.

(E) For a continuous HFID sample probe, the probe must increase the gas stream temperature to 190 ± 11 °C at the exit of the probe.

The continuous hydrocarbon sampling probe:

(A) Is defined as the first 25.4 to 76.2 cm of the continuous hydrocarbon sampling system.

(B) Has a 0.483 cm minimum inside diameter.

(B) The sample probe for continuously integrated NO_x, CO, and CO₂ must be heated and insulated over the entire length, to prevent water condensation, to a minimum temperature of 55 °C. Sample gas temperature immediately before the first filter in the system must be at least 55 °C.” ([15]: § 90.421)

Regulierung der Emissionen für neue, kleine nicht für den Straßenverkehr zugelassene Motoren und Ausrüstung nach EPA CFR 40 Part 1054

(3) This part 1054 applies starting with the modal years noted in the following table:

Tabelle 2-8: § 1054.1 – Part 1054 Applicability by Model Year [19]

Engine type	Engine displacement	Modal year
Handheld	all	2010
Nonhandheld	displacement < 225 cc	2012
Nonhandheld	displacement \geq 225 cc	2011

(a) Applicability. This subpart is addressed to you as a manufacturer but it applies equally to anyone who does testing for you, and to us when we perform testing to determine if your engines or equipment meet emission standards.

(b) General requirements. Use the equipment and procedures for spark-ignition engines in 40 CFR part 1065 to determine whether engines meet the exhaust emission standards, as follows: ([19]: § 1054.501)

Motoren Testverfahren nach EPA CFR 40 Part 1065

Aufgrund der Gefahr sogenannter HC-HangUps macht diese Verordnung klare Empfehlungen hinsichtlich der Beheizung von Probenahmesonden und –leitungen.

(c) Gaseous sample probes:

*“For probes that extract hydrocarbons for THC or NMHC analysis from the **diluted exhaust** of compression-ignition engines, two-stroke spark-ignition engines, or four-stroke spark-ignition engines at or below 19 kW, we recommend heating the probe to minimize hydrocarbon contamination consistent with good engineering judgment. If you routinely fail the contamination check in the 1065.520 pretest check, we recommend heating the probe section to approximately 190 °C to minimize contamination.” ([14]: §1065.145 c)*

(d) Transfer lines:

“You may use a single transfer line to transport a sample of more than one constituent, as long as the transfer line meets all the specifications for each constituent.”

“Use transfer lines with inside surfaces of 300 series stainless steel, PTFE, Viton TM, or any other material that you demonstrate has better properties for emission sampling”

“(i) For NOX transfer lines [...] maintain a sample temperature that prevents aqueous condensation.”

“(ii) For THC transfer lines for testing compression-ignition engines, two-stroke spark-ignition engines, or four-stroke spark-ignition engines at or below 19 kW, maintain a wall temperature tolerance throughout the entire line of (191 ±11) °C.” ([14]: §1065.145 d)

“(b) Component requirements. We recommend that you use a sample flow meter that meets the specifications in Table 1 of § 1065.205. This may involve a laminar flow element, an ultrasonic flow meter, a subsonic venturi, a critical-flow venturi or multiple criticalflow venturis arranged in parallel, a positive-displacement meter, a thermal-mass meter, an averaging Pitot tube, or a hot-wire anemometer. Note that your overall system for measuring sample flow must meet the linearity verification in § 1065.307. For the special case where CFVs are used for both the diluted exhaust and sample-flow measurements and their upstream pressures and temperatures remain similar during testing, you do not have to quantify the flow rate of the sample-flow CFV. In this special case, the sampleflow CFV inherently flow-weights the batch sample relative to the diluted exhaust CFV.” ([14]: § 1065.245)

“The following provisions apply to removing constituents or accounting for background concentrations:

*(2) Either measure these background concentrations the same way you measure diluted exhaust constituents, **or measure them in a way that does not affect your ability to demonstrate compliance with the applicable standards. For example, you may use the following simplifications for background sampling:***

(i) You may disregard any proportional sampling requirements.

(ii) You may use unheated gaseous sampling systems.” ([18]: §1065.140 b)

2.4.1 Probenahmesystem für Beutelbefüllung

- Probenahmesonde (verdünntes Abgas) oberhalb der Verdrängerpumpe und gegen Strömungsrichtung
- Probenahmesonde (Verdünnungsluft) für geschlossene Systeme ist nach der DAF anzubringen, für offene Systeme in der Nähe aber außerhalb der Abgasauffangeinrichtung
- Probenentnahme bei 100%-er Durchmischung der verdünnten Abgase
- Der Mindestdurchsatz des Probenstroms in den Probenahmeeinrichtungen muss 150 Liter/Stunde (2,5 l/min) betragen ([2]: 4.5.3.8.)
- Um ein Auskondensieren von Wasser in den Probensonden und den Transferleitungen zu vermeiden sollten diese auf einer Temperatur von 50-55°C gehalten werden. [12]

Sammelbeutel:

- Ausreichende Kapazität, damit der normale Probenstrom nicht behindert wird
- müssen über eine automatische Selbstverschlusseinrichtung verfügen
- Um die Proben während der gesamten Prüfung entweder zu den jeweiligen Beuteln oder nach außen zu leiten, sind Dreiwegventile zu verwenden
- der Taupunkt der verdünnten Abgase im Beutel muss unter der Umgebungstemperatur liegen
- Ist dies nicht garantiert, müssen die Beutel beheizt werden. Ein exzessives Beheizen der Beutel über 30 °C sollte jedoch aufgrund des sogenannten „out-gassing“ von Kohlenwasserstoffen aus dem Beutelmateriale vermieden werden [13]
- Geeignete Beutel- und Leitungsmaterialien sind in Tabelle 2-9 aufgelistet

Tabelle 2-9: Geeignete Materialien für Gasbeutel und Leitungen [14]

Emissions	Engines Types	
	Compression-ignition Two-stroke spark ignition Four-stroke spark-ignition at or below 19 kW	All other engines
CO, CO ₂ , O ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , NO, NO ₂ ¹ , N ₂ O	Tedlar TM ² , Kynar TM ² , Teflon TM ³ , or 300 series stainless steel ³	Tedlar TM ² , Kynar TM ² , Teflon TM ³ , or 300 series stainless steel ³ .
THC, NMHC	Teflon TM ⁴ or 300 series stainless steel ⁴	Tedlar TM ² , Kynar TM ² , Teflon TM ³ , or 300 series stainless steel ³ .

¹ As long as you prevent aqueous condensation in storage container.

² Up to 40 °C.

³ Up to 202 °C.

⁴ At (191 ±11) °C.

Die Berechnung der gesamt vom Fahrzeug emittierten Emissionen in mg/km wird nach Anhang 2, Kapitel 6 „Ergebnisanalyse“ der Verordnung EU 134/2014 durchgeführt. Die Beutelinhalte werden dazu möglichst zeitnah (spätestens 20 Minuten nach Ende der Prüfung) analysiert. Nach Gleichung (2-3), hier beispielhaft für HC, wird aus dem mitgemessenen Gesamtvolumen des verdünnten Abgases(V), der zurückgelegten Wegstrecke(S) und der korrigierten Konzentration im verdünnten Abgas(HC_C), die gesamte je Zyklusphase emittierte Abgaskomponentenmenge(HC_m) berechnet. Dazu wird der Konzentrationswert des Beutels mit verdünntem Abgas(HC_{VA}) um den Wert des Beutels mit Verdünnungsluft(HC_{VL}) korrigiert, Gleichung (2-4). Das Emissionsergebnis für den jeweiligen Zyklusteil wird dann mit den in Tabelle 2-4 vorgeschriebenen Gewichtungsfaktoren multipliziert. Die Summe der gewichteten Emissionen der einzelnen Zyklusphasen ergibt den limitierten Emissionswert in mg/km, Gleichung (2-5).

$$HC_m = \frac{1}{S} * V * d_{HC} * \frac{HC_C}{10^6} \quad (2-3)$$

d_{HC} = Dichte der Kohlenwasserstoffe bei Normbedingungen

$$HC_C = HC_{VA} - HC_{VL} * \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (2-4)$$

$$HC_{m_ges} = w_1 * HC_{m1} + w_2 * HC_{m2} + w_3 * HC_{m3} \quad (2-5)$$

2.4.2 Probenahmesystem für modale Messung

Die modale Messung ist keine für die Typengenehmigung erforderliche Messung, jedoch ist sie für die Forschung und Entwicklung von großer Bedeutung. Schwierigkeiten bestehen hier zum einen aufgrund sehr unterschiedlicher Verdünnungsgrade, z.B. Leerlauf und Beschleunigung, während des gesamten Testzyklus den Taupunkt des verdünnten Abgases nicht zu unterschreiten und zum anderen, innerhalb der Analysator-Grenzen zu bleiben. Hinzu kommt die zeitliche Verschiebung der aufgezeichneten Emissionsmessdaten, aufgrund der vom Abgas vom Auspuff bis zum Analysegerät zurückgelegten Wegstrecke, die sog. Totzeit. Eine weitere Problematik stellt die Durchmischung des Abgases beim Durchströmen der Anlage dar, wodurch man ein unschärferes, „verwaschenes“ Signal erhält. Zudem stellt die modale Messung höhere Anforderungen an die Messgeräte.

Für das Probenahmesystem für kontinuierliche Messung gilt allgemein:

- möglichst dünne und kurze Leitungen (TeflonTM oder Edelstahl)
- Um ein Auskondensieren von Wasser in den Probensonden und den Transferleitungen zu vermeiden, sollten diese auf einer Temperatur von 50-55°C gehalten werden. [12]
- Probenentnahme bei 100%iger Durchmischung der verdünnten Abgase

Im Falle von Diesel betriebenen Fahrzeugen und Motoren ohne Abgasnachbehandlung sollten besondere Vorsichtsmaßnahmen für die HC-Probenentnahme und Analyse getroffen werden, um das sog. „HC-Hang-Up“ zu vermeiden. Dies gilt auch für verdünnte Abgase.

- Die gesamten Leitungen sollten in diesem Fall auf einer Temperatur von 191 ±11 °C gehalten werden.

„Aber auch bei verdünntem Abgas muss ein Kondensieren von schweren Kohlenwasserstoffen (HC), wie sie bei Dieselmotoren vorkommen, verhindert werden. Dazu wird die komplette Messkette bis zum HC Analysator auf ca. 190 °C beheizt. Die Messung erfolgt unmittelbar und kontinuierlich aus dem verdünnten Abgas und nicht aus den Beuteln der CVS Anlage.“ ([3]: S.539)

Für die modale Messung wird ein Teil des verdünnten Abgases kontinuierlich zu den Analysatoren geleitet und gemessen. Für eine korrekte Zuordnung zum jeweiligen Motorbetriebspunkt müssen diese Emissionsdaten nachträglich zum einen um die konstante Totzeit (von Mischstelle bis Analysator) und um die variable Totzeit (unterschiedlicher Abgasstrom im TT) korrigiert werden. Zudem ist auch das Ansprechverhalten der Analysatoren unterschiedlich, weshalb jede Emissionskomponente eine eigene zeitliche Zuordnung der Messdaten zum zugehörigen Motorbetriebspunkt erhalten sollte. Für genauere Untersuchung der Auswertemethodik wird an dieser Stelle auf die Diplomarbeit von Weller Konstantin „Weiterentwicklung der Auswertemethodik modaler Emissionsdaten einer CVS –Anlage“ aus dem Jahr 2015 verwiesen [20].

2.5 Probenahmesystem für Partikelmasse (PM)

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an ein Partikelprobenahmesystem, entsprechend der Richtlinie EU 134/2014, aufgezeigt. Die Partikelprobenahmeeinheit besteht nach [2] Anhang 2, 4.5.3.12. aus folgenden Komponenten und ist in Abbildung 2-15 schematisch dargestellt.

- Probenahmesonde(PSP) im Verdünnungstunnel(DT)
- Verbindungsrohr(PTT) für die Weiterleitung der Partikel
- Partikelvorklassierer (PCF)
- Filterhalter(FH)
- Teilstrompumpe(P)
- Durchsatzregelungs-(FC) und –messeinrichtungen(FM)

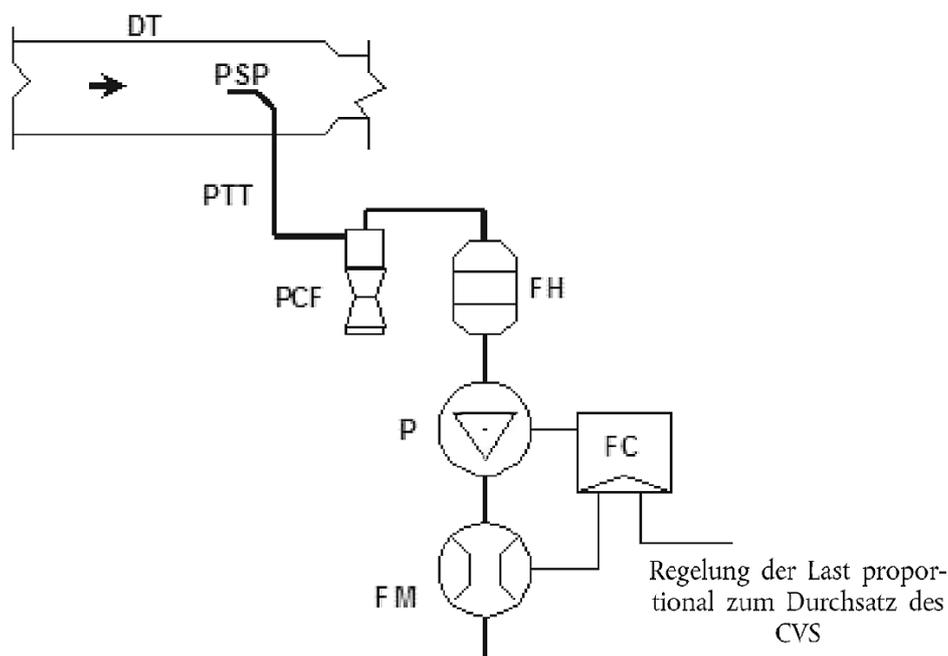


Abbildung 2-15: Probenahme-System [2]

„Eine Probe des verdünnten Abgases wird mithilfe der Probenahmepumpe P durch die Partikel-Probenahmesonde PSP und das Partikelübertragungsrohr PTT aus dem Verdünnungstunnel DT entnommen. Anschließend wird die Probe durch den Partikelvorklassierer PCF und die Filterhalter FH geleitet, in denen die Partikel-Probenahmefilter enthalten sind. Mit dem Durchsatzregler (FC) wird der Durchsatz für die Probenahme eingestellt.“ ([2]: Anhang 2, 4.5.3.12.1.4.)

Allgemeine Anforderungen (nach [2]: Anhang2, 4.5.3.12.1.2.)

- Entnahme eines repräsentativen, homogenen Luft-Abgas-Gemisches
- Durchsatz der Partikelprobe muss proportional zum Gesamtdurchsatz im DT sein (Durchsatztoleranz für die Partikelprobe: $\pm 5\%$) Verhältnis von CVS Durchfluss zu Probendurchfluss bezogen auf Startverhältnis
- Probengas-Temperatur $< 325,2\text{K}$ (52°C); 20cm vor oder hinter der Oberfläche des Partikelfilters (zwischen 42 und 52°C nach [14] §1065.140)
- Bei Regenerierungsprüfung muss die Temperatur unter $465,2\text{K}$ (192°C) liegen
- Partikelprobe wird auf einem Einfachfilter aufgefangen

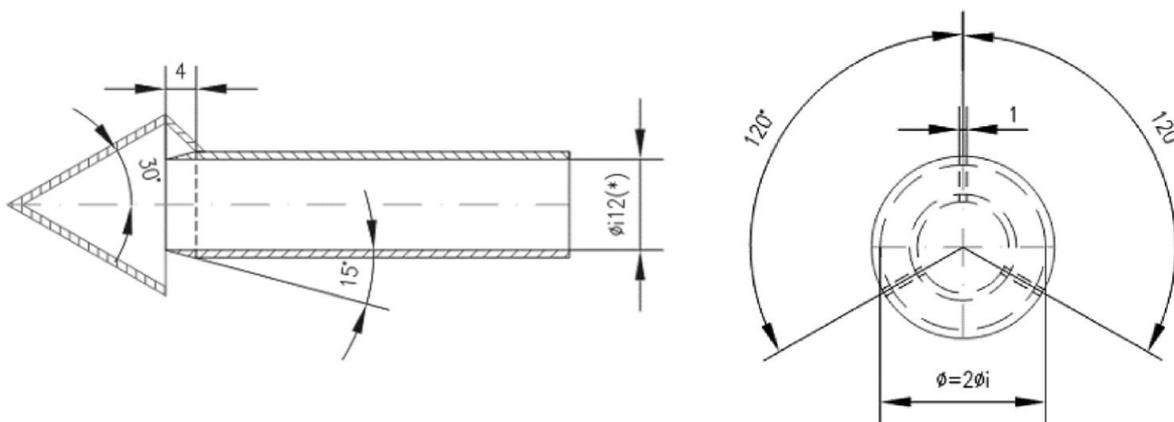
- Alle Teile des Verdünnungssystems und des Probenahmesystems sind so auszulegen, dass sich möglichst wenig Partikel auf ihnen ablagern und die Partikel sich so wenig wie möglich verändern. Alle Teile müssen aus elektrisch leitenden und nicht reagierenden Werkstoffen bestehen
- Ist ein Ausgleich der Durchsatzschwankungen nicht möglich, dann sind ein Wärmetauscher und ein Temperaturregler nach der Anlage 4 der EU Verordnung 134/2014 zu verwenden, damit ein konstanter Durchsatz durch das System und damit die Proportionalität des Durchsatzes der Probe sichergestellt ist

Besondere Anforderungen (nach [2]: Anhang 2, 4.5.3.12.1.3.)

1) Probenahmesonde für Partikel (PM):

- Einbau in der Nähe der Mittellinie des Tunnels(DT)
- Entfernung zwischen 10 und 20 Tunneldurchmessern stromabwärts vom Abgaseintritt in den Tunnel
- Innendurchmesser von mindestens 12 mm
- Wenn mehrere Sonden eingesetzt werden, sind diese mit mindestens 5 cm Abstand voneinander gleichmäßig um die Mittelachse des Verdünnungstunnels herum anzuordnen. Jede Sonde muss scharfkantig sein, ein offenes Ende haben und mit der Spitze gegen die Strömungsrichtung zeigen.
- Wenn gleichzeitig mehr als eine Probe mit einer einzigen Probenahmesonde entnommen wird, ist der entnommene Gasstrom in zwei identische Teilströme zu teilen, um verzerrte Ergebnisse zu vermeiden.
- Der Abstand von der Sondenspitze zum Filterhalter muss mindestens fünf Sondendurchmesser betragen, darf aber nicht größer als 1020 mm sein.
- Mit der Probenahmesonde muss die Größenklassierung der Partikel nach den Angaben unter Nummer 4.5.3.12.1.3.1.4 durchgeführt werden können. Es wird empfohlen, dafür eine scharfkantige, offene Sonde, deren Spitze gegen die Strömungsrichtung zeigt, sowie einen Vorklassierer (Zyklonabscheider, etc.) zu verwenden.

„Es wird empfohlen, vor dem Filterhalter einen Vorklassierer für Partikel (z. B. Zyklon- oder Trägheitsabscheider) zu verwenden. Eine Probenahmesonde entsprechend der Darstellung in der Abbildung 1-6 [hier: Abbildung 2-16] ist jedoch als geeignete Vorrichtung zur Größenklassierung zulässig.“ ([2]: Anhang 2, 4.5.3.12.1.1.2.)



(*) Mindest-Innendurchmesser
Wanddicke: ~ 1 mm - Werkstoff: rostfreier Stahl

Abbildung 2-16: Ausführung der Partikel-Probenahmesonde [2]

„Der Vorklassierer (z. B. Zyklon- oder Trägheitsabscheider) muss vor dem Filterhalter angebracht sein. Der Vorklassierer muss bei dem Volumendurchsatz, der für die Probenahme zur Bestimmung der emittierten Partikelmasse gewählt wurde, einen 50 %-Trennschnitt für einen Partikeldurchmesser zwischen $2,5 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ haben. Der Vorklassierer muss so beschaffen sein, dass bei dem für die Probenahme zur Bestimmung der emittierten Partikelmasse gewählten Volumendurchsatz mindestens 99 Masseprozent der in den Vorklassierer geleiteten Partikel mit einem Durchmesser von $1 \mu\text{m}$, diesen durch die Austrittsöffnung wieder verlassen. Eine Probenahmesonde entsprechend der Darstellung in der Abbildung 1-6 [hier Abbildung 2-16], die als geeignete Vorrichtung zur Größenklassierung verwendet wird, ist jedoch als Alternative zu einem getrennten Vorklassierer zulässig.“ ([2]: Anhang2, 4.5.3.12.1.3.1.4.)

2) Probenahmepumpe und Durchsatzmesser (nach [2]: Anhang2, 4.5.3.12.1.3.2)

- Die Messeinrichtung für den Probegasdurchsatz besteht aus Pumpen, Gasströmungsreglern und Durchsatzmeseinrichtungen
- Die Temperatur des Probegasstroms darf im Durchsatzmesser nicht um mehr als $\pm 3\text{K}$ schwanken; (gilt nicht für Regenerierungsprüfungen an Fahrzeugen mit einem periodisch regenerierenden Abgasnachbehandlungssystem)
- Wenn das Durchflussvolumen sich wegen einer zu hohen Filterbelastung unzulässig verändert, muss die Prüfung abgebrochen werden. Bei der Wiederholung muss ein geringerer Durchsatz eingestellt werden

3) Filter und Filterhalter (nach [2]: Anhang2, 4.5.3.12.1.3.3)

- Ein Ventil muss in Strömungsrichtung hinter dem Filter angeordnet sein. Das Ventil muss sich innerhalb einer Sekunde nach Beginn und Ende der Prüfung öffnen und schließen können.
- Filter mit einem Durchmesser von 47 mm
- abgeschiedene Partikelmasse (P_e) $\geq 20 \mu\text{g}$ (Empfehlung)
- Es müssen fluorkohlenstoffbeschichtete Glasfaserfilter oder Fluorkohlenstoff-Membranfilter verwendet werden.

- Alle Filtertypen müssen für $0,3\mu\text{m}$ DOP (Diocetylphthalat) oder PAO (Polyalphaolefin) (CS 68649-12-7 oder CS 68037-01-4) einen Abscheidegrad von mindestens 99% bei einer Filteranströmgeschwindigkeit von $5,33\text{cm/s}$ haben.
- Filterfläche muss mindestens 1075mm^2 groß sein
- Der Filterhalter muss so konstruiert sein, dass der Gasstrom gleichmäßig über die gesamte Filterfläche verteilt wird.

4) Sekundäre Verdünnung

Um die vorgeschriebene Temperatur von $< 52\text{ }^\circ\text{C}$ am Partikelfilter einzuhalten, kann eine sekundäre Verdünnung eingesetzt werden. Dabei wird der Probenstrom nochmals mit gefilterter Umgebungsluft gemischt und so abgekühlt, bevor er durch den Filter strömt. Die Anlage ist schemenhaft in Abbildung 2-17 dargestellt. Dabei wird der Verdünnungsluftdurchsatz in der Regel konstant gehalten, während mittels eines Durchflussreglers (FC3) der Gesamtdurchsatz durch die Pumpe so geregelt wird, dass der Probenstrom proportional zum Gesamtdurchsatz der CVS-Anlage bleibt.

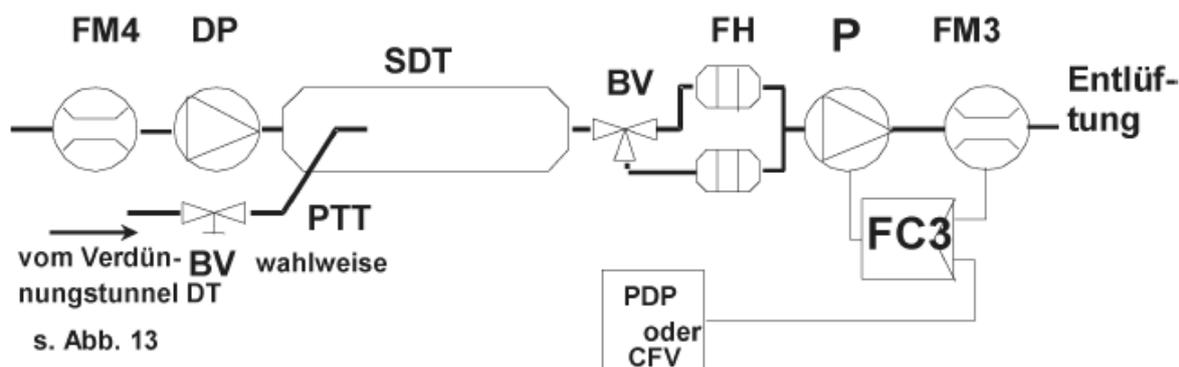


Abbildung 2-17: Sekundärverdünnungstunnel für die PM Messung [9]

- Die Leitung vom Sondeneintritt bis zum SDT darf höchstens 1020 mm lang sein
- Kann beheizt (max. 52°C) oder isoliert sein
- SDT Durchmesser $> 75\text{ mm}$ und so lang, dass die doppelt verdünnte Probe mindestens $0,25\text{ s}$ in ihm verweilt
- Hauptfilter FH max. 300 mm Abstand vom SDT Ausgang
- Das Gasmess- oder Durchflussmessgerät muss so weit von der Probenahmpumpe entfernt sein, dass die Temperatur des einströmenden Gases konstant bleibt ($\pm 3\text{ K}$), wenn keine Durchflusskorrektur durch FC3 erfolgt.
- Die Verdünnungsluftpumpe ist so anzuordnen, dass die sekundäre Verdünnungsluft mit einer Temperatur von 298 K (25°C) $\pm 5\text{ K}$ zugeführt wird.
- Der Durchmesser des Kugelventils darf nicht geringer als der Innendurchmesser des Entnahmerohrs sein und seine Schaltzeit muss geringer als $0,5\text{ Sekunden}$ sein. [9]

5) Messung der Hintergrund-Partikelmasse (nach 5.2.1.5. [2])

„Der Partikelgehalt der Verdünnungsluft kann bestimmt werden, indem gefilterte Verdünnungsluft durch den Partikelfilter geleitet wird. Diese ist an derselben Stelle zu entnehmen wie die Partikelprobe, wenn eine Messung der Partikelmasse nach Anhang VI Teil A der Verordnung (EU) Nr. 168/2013 erforderlich ist. Es ist eine Messung vor oder nach der Prüfung durchzuführen. Die Messung der Partikelmasse kann berichtigt werden, indem die Hintergrundkonzentration aus dem Verdünnungssystem abgezogen wird. Die zulässige Hintergrundkonzentration beträgt ≤ 1 mg/km (oder die entsprechende Masse auf dem Filter). Überschreitet die Hintergrundkonzentration diesen Wert, ist der Vorgabewert von 1 mg/km (oder die entsprechende Masse auf dem Filter) zu verwenden. Führt der Abzug der Hintergrundkonzentration zu einem negativen Ergebnis, ist das Ergebnis für die Partikelmasse als null zu werten.“

Wird nun ein offenes System verwendet, so kann Filterbeladung aufgrund von Partikeln, die nicht aus dem Abgas stammen, erhöht werden, z.B. Reifenabrieb, Bremsenabrieb, usw. Diese Partikel sind bei der Beladung des Filters mit Verdünnungsluft nicht enthalten, da das Fahrzeug währenddessen nicht betrieben wird. Somit würden diese nicht zum Abzug gebracht werden. Es folgt daraus eine scheinbar höhere Partikelemission. Zusätzlich kann die Verdünnungsluft beim offenen System nicht gefiltert werden, wodurch unter Umständen die zulässige Hintergrundkonzentration von ≤ 1 mg/km überschritten werden kann. Die Arbeit von Tromayer J., Neumann G., Kirchberger R., Eichelseder H., „A demonstration of the emission behaviour of 50cm³ mopeds in Europe including unregulated components and particulate matter“ Graz 2011 ergaben jedoch eine vernachlässigbare Hintergrundkonzentration [22].

2.6 Probennahme System für Partikelanzahl PN

Eine Liste die bisher gemachten Verordnungen, zur Reglementierung der Partikelanzahl(PN) von Fahrzeugen und Motoren, kann der Tabelle 2-10 entnommen werden.

Tabelle 2-10: Chronologie der PN-Verordnungen [7]

Datum	Verordnung
2009	<i>PN Limit für europäische Diesel PKW</i>
2013	<i>PN Limit für europäische schwere Nutzfahrzeugmotoren</i>
2014	<i>PN Limit für europäische Benzin DI-Motoren für PKW</i>

Die EU Verordnung 168/2013 macht noch keine Reglementierung hinsichtlich der emittierten Partikelanzahl. Jedoch wurde das Joint Research Centre (JRC) von der Europäischen Kommission mit einer Studie beauftragt, die sich unter anderem mit einer möglichen und notwendigen Reglementierung der Partikelanzahl für zukünftige Verordnungen beschäftigt.

„Gestützt auf zukünftig verfügbare Daten sollte eine durch diese Verordnung vorgeschriebene Umweltverträglichkeitsstudie durch Modellbildung sowie durch eine Untersuchung der technischen Machbarkeit und eine Kostenwirksamkeitsanalyse anhand der verfügbaren neuesten Daten weitere Grundlagen liefern. Darüber hinaus sollten in der Studie unter anderem die Realisierbarkeit und Kostenwirksamkeit von Anforderungen für die Übereinstimmungsprüfung für in Betrieb befindliche Fahrzeuge, Anforderungen für Off-Cycle-Emissionen und einer Begrenzung der emittierten Partikelzahl für bestimmte (Unter-)Klassen bewertet werden. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Studie sollte die Kommission erwägen, einen Vorschlag zur Aufnahme dieser neuen Elemente in künftige Rechtsvorschriften für die Typgenehmigung für die Zeit nach den in dieser Verordnung vorgesehenen Stufen zu unterbreiten.“ ([6]: L60/53)

Im Rahmen dieser Studie wurden die Partikelemissionen (PN) von L-Kategorie Fahrzeugen vom JRC speziell untersucht [4]. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sollen im Folgenden kurz aufgezeigt werden.

Der Versuchsaufbau für die Partikelmessung ist in Abbildung 2-18 dargestellt. Es wurden dabei zwei Partikel-Messsysteme (PMP) miteinander verglichen, einmal die übliche Entnahme aus dem CVS-Tunnel, wie bei PKWs bereits vorgeschrieben und einmal die Entnahme aus dem Rohabgas. Zusätzlich wurde noch ein „Engine Exhaust Particle Sizer“ (EEPS) für die Messung der Größenverteilung zusammen mit einem „Catalytik-Stripper“ (CS) zur Entfernung flüchtiger Partikel eingesetzt.

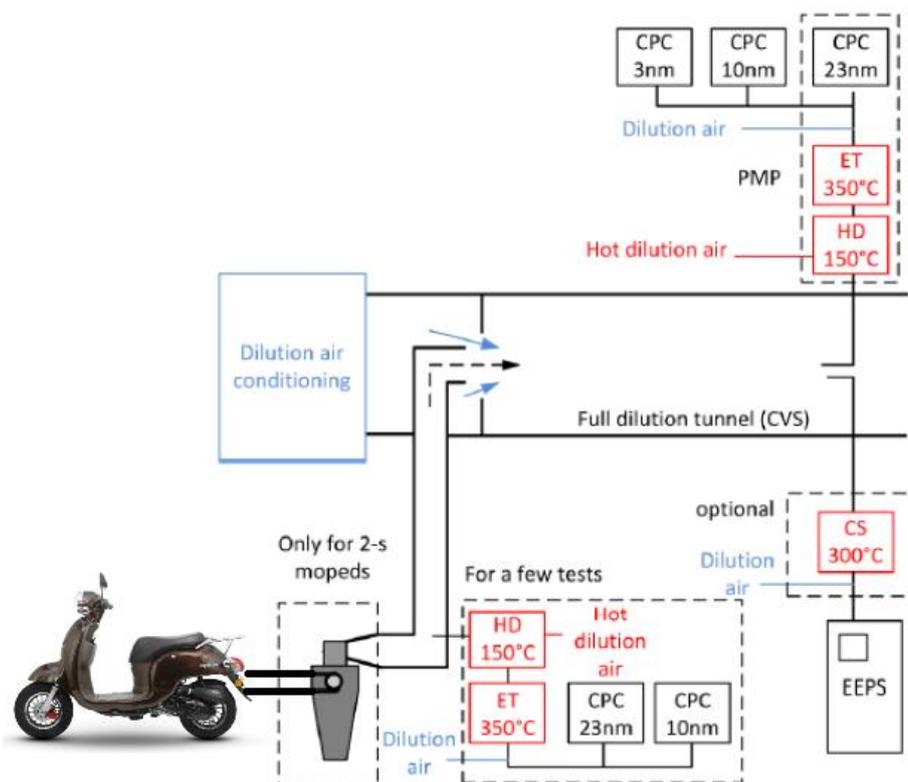


Abbildung 2-18: Versuchsaufbau [4]

Probenahme Empfehlung

“Generally, the current United Nations legislative procedures for light-duty vehicles and heavy-duty engines (i.e. measurement of >23 nm with hot dilution and evaporation tube) seem robust for L-category vehicles as well, but dilution of at least 100×10 is recommended (even higher for 2-stroke engines). A catalytic stripper is recommended when lower dilutions have to be used (e.g. for size distribution measurements) or sub-10 nm measurements. In this case, the high losses at sub-10 nm sizes have to be considered. The standalone CS of this study could remove volatiles up to 15 mg/m^3 , while the CS in a PMP configuration could remove 20 times higher. A PMP system (without CS) can handle 2-3 orders of magnitude lower hydrocarbons mass concentration at the inlet of the ET (depending on the lower size of the CPC).” ([4]: S 7)

Die Abbildung 2-19 zeigt eine schematische Darstellung eines Partikel-Probenahmesystems für die PN-Messung bei PKWs nach der UNECE Regelung Nr. 83. Wie zu sehen ist, setzt diese eine Konditionierung der Verdünnungsluft voraus, wozu die CVS-Anlage geschlossen ausgeführt werden müsste.

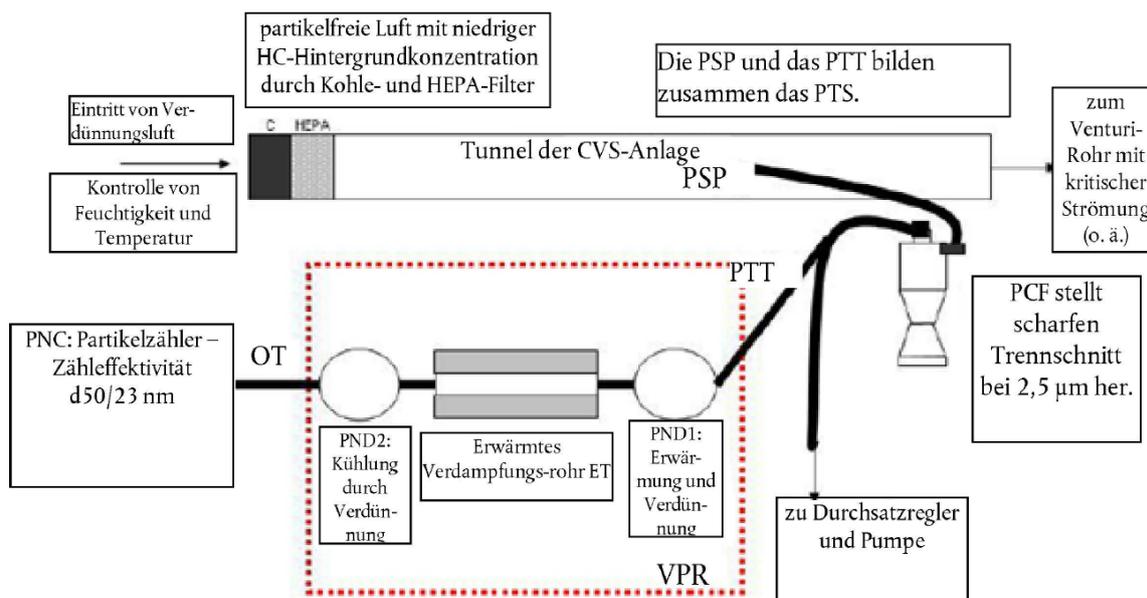


Abbildung 2-19: Schematische Darstellung des empfohlenen Partikel-Probenahmesystems für PKWs [27]

Probennahem im Verdünnungstunnel oder Auspuffende

Die Abbildung 2-20 zeigt den Verlauf der Partikelemissionen für Partikel größer 23nm und 10nm, sowohl für die Entnahme aus dem Auspuffendrohr (TP) als auch die Entnahme aus dem Verdünnungstunnel (CVS). Durchgeführt wurden die Messungen bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit.

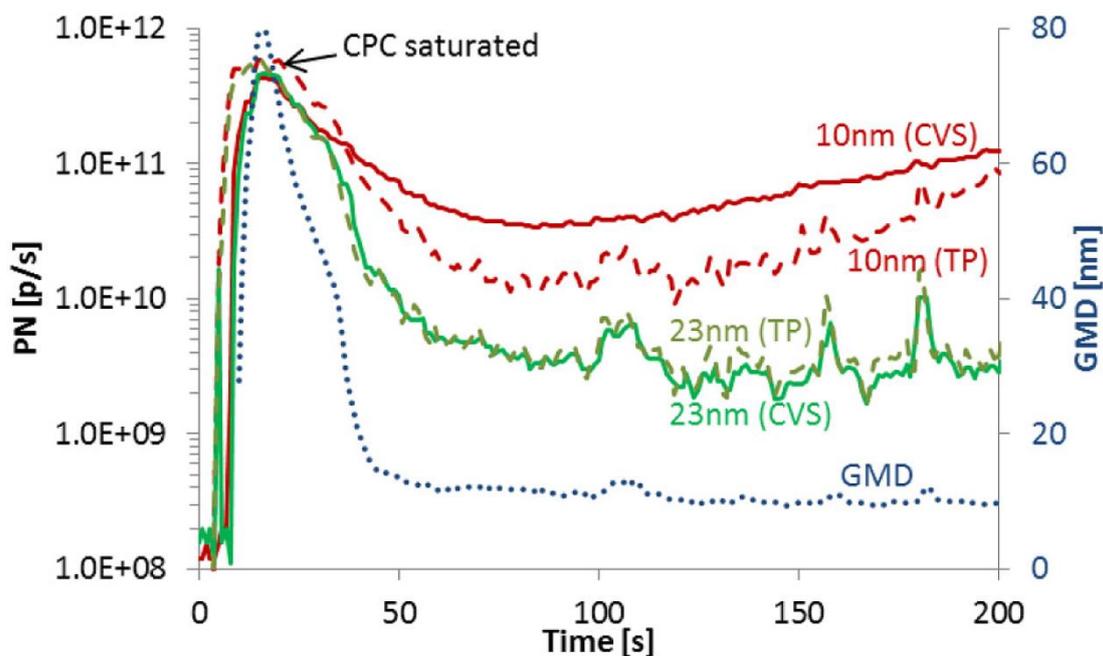


Abbildung 2-20: Vergleich von Messungen am Verdünnungstunnel (CVS) und Auspuffende (TP) (L3e-A1 #1) während eines Tests mit konstanter Geschwindigkeit. [4]

“Initially the differences between tailpipe and dilution tunnel were examined. The tailpipe emissions are typically higher because agglomeration, thermophoresis and diffusion decrease the particle concentration in the transfer tube between tailpipe and dilution tunnel. For >23 nm emissions the differences were around 10-20% and noticeable mainly for the small engines (low exhaust flow rates). For sub-23 nm measurements the differences were higher, reaching 50%. There were also some interesting cases where the sub-23 nm emissions at the tailpipe were lower at the tailpipe than at the dilution tunnel. This occurred when the Geometric Mean Diameter (GMD) of the particles was around 10 nm, thus agglomeration or efficiency of thermal pre-treatment played an important role.” ([4]: S.10)

Korrelation der Prüfzyklen

Die gute Korrelation zwischen den Prüfzyklen ECE R40 & R47 und dem WMTC für die PN-Messung für Partikel > 23 nm ist in Abbildung 2-21 ersichtlich. Gleich gute Ergebnisse wurden auch für Partikel > 10 nm erzielt.

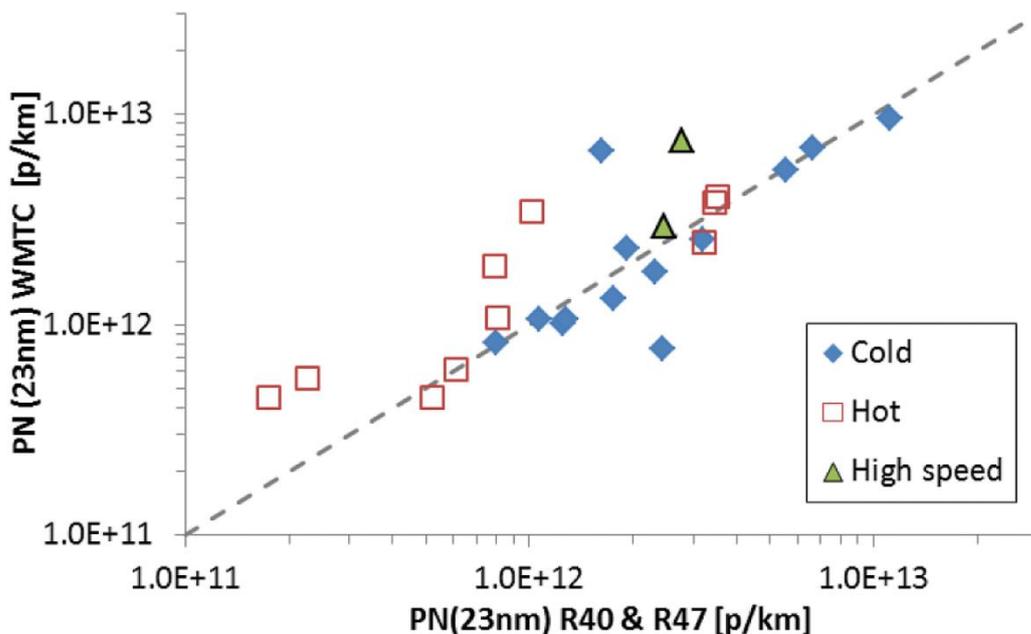


Abbildung 2-21: Korrelation der verschiedenen Prüfzyklen für Partikel > 23 nm [4]

PN Emissions Level

“L-category vehicles (two- or three-wheel vehicles and quadri-cycles) are a widespread means of transport and their contribution to urban particulate emissions has become significant especially after the drastic decreases of particulate emissions from light duty vehicles. In this study 5 mopeds, 9 motorcycles, 2 tricycles (one of them diesel) and 1 quad were tested regarding their Particle Number (PN) emissions.” [4]

“Table 9 [hier Tabelle 2-11] displays the ratio between the PN level measured for L-category vehicles in this study and the passenger car limit value of PN emissions measured with a PMP compliant system (limit = 6×10^{11} particles/km). Orange values are those within one order of magnitude. Based on previous experience, they might

fall below limit values once a specific measurement protocol is designed. It is unlikely though that the values up to 20 times the passenger cars limit (values in red) will be reduced below limits just by the choice of an appropriate protocol or reasonable limit value.” ([7]: S 117)

Tabelle 2-11: Verhältnis zwischen dem PN Level gemessener Kategorie-L Fahrzeuge und dem PN Grenzwert für PKW, gemessen mit einem PMP konformen System [7]

Fahrzeugtyp	PN Level / 6×10^{11} p/km (limit for passenger cars)
Moped	3-20
Motorcycle	2-4
Quad	12
Tricycle	3

Zusammenfassung

“Based on the results, it is recommended to use a modified PMP method with a 10 nm cutoff in particle size. To minimize the presence of artifacts either high dilution ratios or the use of a catalytic stripper (or both) are highly recommended.” ([7]: S 117)

“The European Commission is not planning to introduce a particle number limit for L-category vehicles at present. Therefore the results of this study should be considered as input for future feasibility studies. In addition, in this study we apply a measurement protocol that was designed for passenger cars to L-category vehicles, because it is simply the safer and up-to-date procedure that can be followed.” ([7]: S 117)

“Although the PMP protocol fails to measure a significant part of the L-category solid emissions (>70% for motorcycles, vs <40% for passenger cars), there were not many cases in which the PMP protocol could not identify a high emitter. Nevertheless, this topic should be further addressed, especially when a sufficient number of Euro 4 models will be on the market.” ([11]: S.11)

2.7 Verwendbare Materialien

Bevorzugtes Material für die Probenahmeleitungen und für die in den Leitungen verbauten Komponenten (z.B. Fittings, Abzweiger, Pumpen, usw.) ist Edelstahl oder PTFE oder VitonTM. Andere Materialien von denen nachgewiesen wurde, dass sie sich für Abgassammlung und Emissionsmessung eignen sind ebenfalls zulässig. ([14]: § 1065.145)

2.8 Steuerung & Datenaufzeichnung

Die Messtechnik für die Erfassung der Anlagenparameter wie beispielsweise Temperatur, Druck, CVS-Durchfluss und in weiterer Folge auch die Regelung des Probendurchflusses muss mindestens mit der in Tabelle 2-12 angegebenen minimalen Frequenz arbeiten.

Tabelle 2-12: Minimale Frequenz für die Datenerfassung und die Regelung ([21]: §1066.125)

Applicable section	Measured values	Minimum command and control frequency ^a	Minimum recording frequency ^{b,c}
§1066.310 §1066.315	Vehicle speed		10 Hz.
§1066.425	Continuous concentrations of raw or dilute analyzers		1 Hz.
§1066.425 §1066.501	Power analyzer		1 Hz.
§1066.425	Bag concentrations of raw or dilute analyzers		1 mean value per test interval.
40 CFR 1065.545 §1066.425	Diluted exhaust flow rate from a CVS with a heat exchanger upstream of the flow measurement		1 Hz.
40 CFR 1065.545 §1066.425	Diluted exhaust flow rate from a CVS without a heat exchanger upstream of the flow measurement	5 Hz	1 Hz means.
40 CFR 1065.545 §1066.425	Dilution air flow if actively controlled (for example, a partial-flow PM sampling system) ^d	5 Hz	1 Hz means.
40 CFR 1065.545 §1066.425	Sample flow from a CVS that has a heat exchanger	1 Hz	1 Hz.
40 CFR 1065.545 §1066.425	Sample flow from a CVS that does not have a heat exchanger	5 Hz	1 Hz means.
§1066.420	Ambient temperature		1 Hz. ^e
§1066.420	Ambient humidity		1 Hz. ^e
§1066.420	Heated sample system temperatures, including PM filter face		1 Hz.

^a CFVs that are not using active control are exempt from meeting this requirement due to their operating principle.

^b 1 Hz means are data reported from the instrument at a higher frequency, but recorded as a series of 1 s mean values at a rate of 1 Hz.

^c For CFVs in a CVS, the minimum recording frequency is 1 Hz. For CFVs used to control sampling from a CFV CVS, the minimum recording frequency is not applicable.

^d This is not applicable to CVS dilution air.

^e Unless specified elsewhere in this part or the standard-setting part. Note that this provision does not apply to soak periods where recording frequencies are not specified. For these instances, we recommend a recording frequency of ≥ 0.016 Hz.

3 Bestandsaufnahme

Um den Aufwand für eine neue CVS-Anlage bzw. für den Umbau der alten Anlage besser abschätzen zu können, erfolgt zu Beginn des folgenden Kapitels eine Untersuchung der aktuellen CVS-Anlage. Mögliche Schwachstellen und Widersprüche zur geltenden Verordnungen sollen dabei herausgearbeitet, sowie Besonderheiten und Problematiken für zukünftige Anforderungen aufgezeigt werden. Die CVS-Anlage am Zweiradrollenprüfstand der TU Graz, entstand im Rahmen der Diplomarbeit von Knapp Hans im Jahre 1990 [16]. Ursprünglich war die Anlage als mobile CVS-Anlage entworfen worden, mit besonderem Augenmerk auf Kompaktheit.

3.1 Anlagenaufbau

Im Zuge von Modernisierungen wurden etliche Teile getauscht und verändert, die damalige Steuerung wurde durch eine modernere SPS-Steuerung ersetzt und in die Prüfstandssteuerung, eingebunden. Die Abbildung 3-1 zeigt das Prinzipschaltbild der ursprünglichen CVS-Anlage. Die Anlage ist in einem Industrieschrank mit den Abmessungen 800*800*2000mm untergebracht. Der Schrankaufbau der ursprünglichen Anlage kann dem Übersichtsplan in Abbildung 3-2 entnommen werden. Die Anlage wurde als mobile CVS-Anlage ausgeführt, jedoch wird sie nicht mehr in diesem Sinne eingesetzt, sondern ist fester Bestandteil der Prüfstandstechnik des Prüfstandes. Aus diesem Grund ist eine Unterbringung der neuen Anlage im alten CVS-Schrank nicht zwingend nötig. Vielmehr soll sich die neue Anlage in das gesamte Prüfstandkonzept eingliedern lassen und sowohl für den Zweiradrollenprüfstand als auch für den Motorenprüfstand zur Verfügung stehen. Dabei soll die Anlage so konstruiert werden, dass sich möglichst kurze Strömungswege für das Rohabgas und das verdünnte Abgas ergeben. Die in Abbildung 3-1 dargestellten Ventile zur Steuerung der Luft- und Abgaswege wurden wie in Abbildung 3-3 dargestellt, durch drei Magnetventilblöcke realisiert.

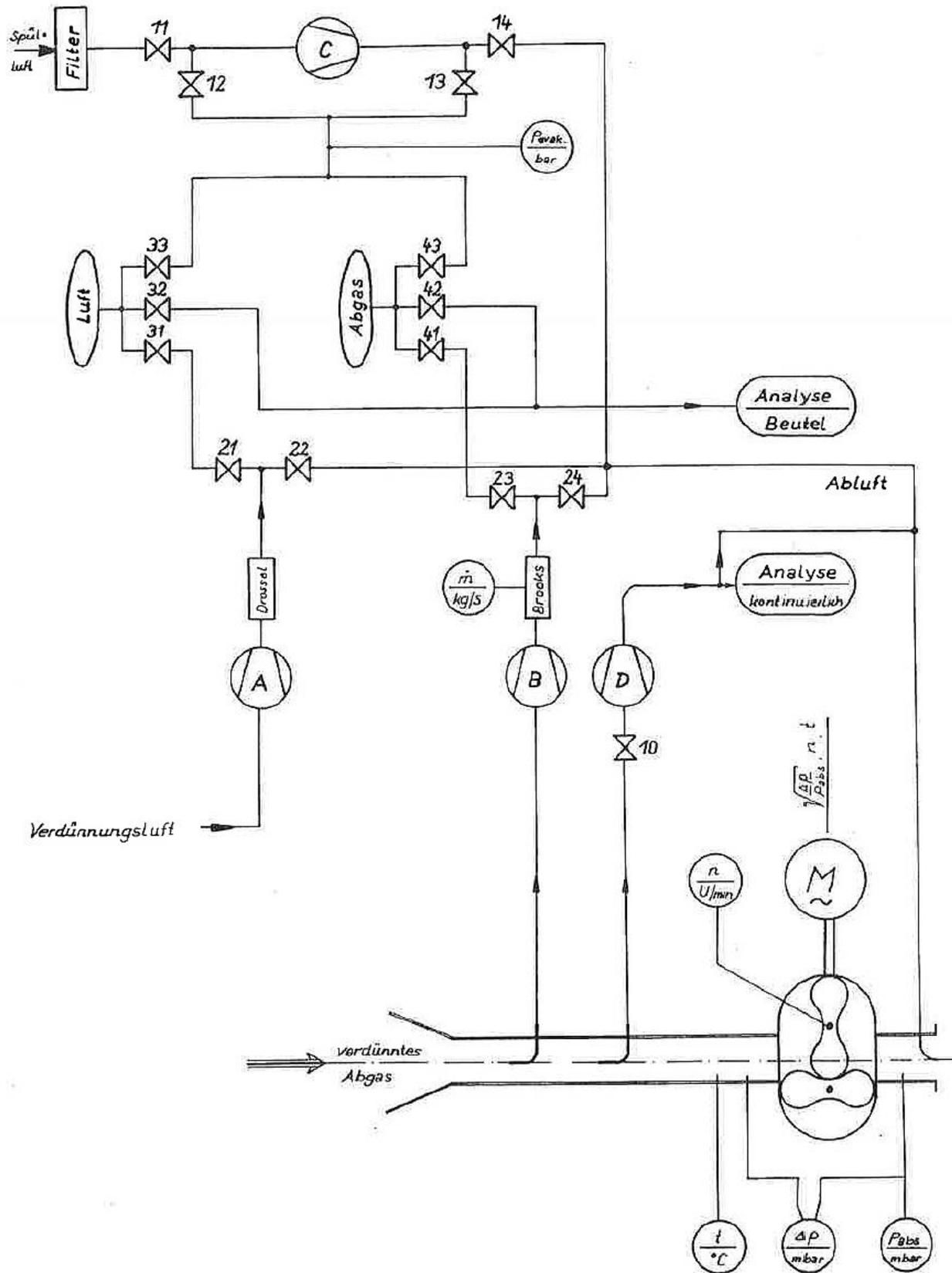


Abbildung 3-1: Prinzipschaltbild der CVS-Anlage auf dem P7 [16]

ÜBERSICHTSPLAN

- 1 Rechner
- 2 Bildschirm
- 3 Hupe
- 4 Tastatur
- 5 Absolutdruck =
transmitter
- 6 Differenzdruck =
transmitter
- 7 Evakuierdruck =
transmitter
- 8 Spülpumpe
- 9 Gebläsemotor
- 10 Massenstrom =
regler
- 11 Drossel
- 12 Beutelpumpe
Abgas
- 13 Beutelpumpe
Verdünnungsluft
- 14 Gebläse
- 15 Trafo 220/115 V
- 16 Spülluftfilter
- 17 Pumpe D (kontinu-
ierliche Messung)
- 18 Magnetventilblöcke
- 19 Meßstutzen
- 20 Drehzahlgeber

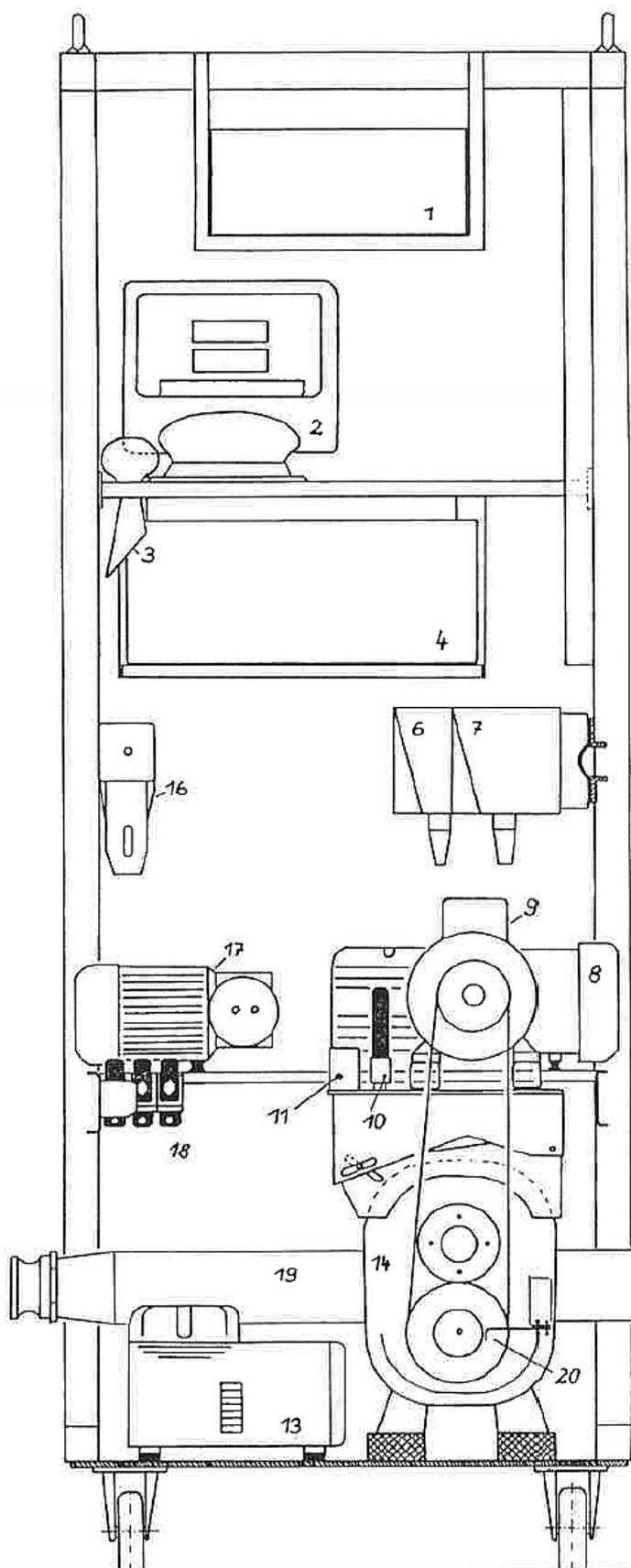


Abbildung 3-2: Übersichtsplan 1 [16]

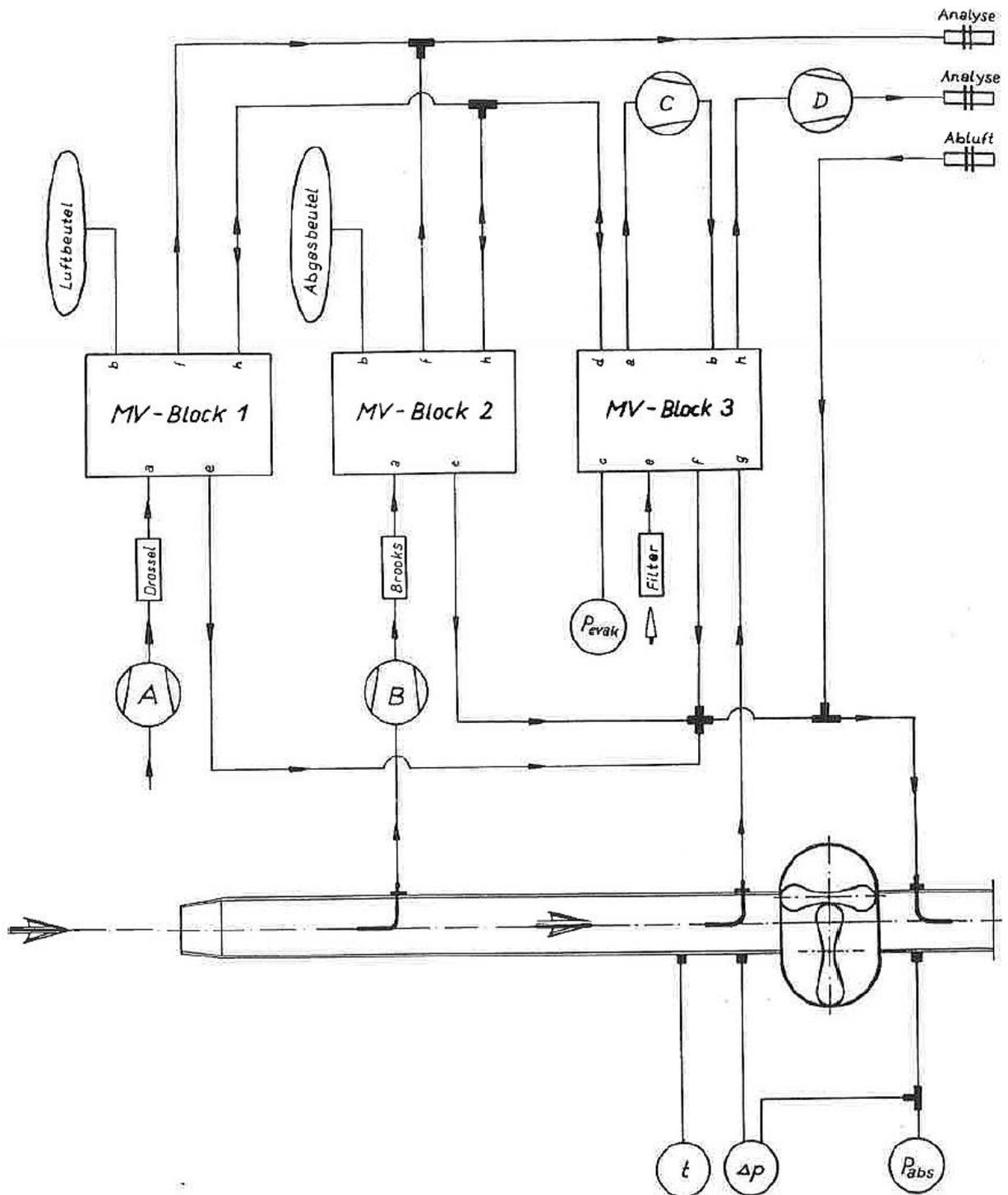


Abbildung 3-3: Schlauchplan der CVS-Anlage [16]

3.2 Gesamtvolumenstrommessung

Die derzeitige CVS-Anlage am P7 wird mit einem Roots-Gebläse(PDP) und einem Asynchronmotor mit einer elektrischen Leistung von 1,5 kW betrieben. Für die Sicherstellung eines konstanten Volumenstroms (bezogen auf Normbedingungen 0°C und 1013mbar) und zur Kompensation von auftretenden Temperaturschwankungen wird die Temperatur und der Absolutdruck des verdünnten Abgases hinter dem Gebläse, sowie der Differenzdruck über das Gebläse kontinuierlich mitgemessen und die Drehzahl des Gebläses entsprechend angepasst. Geregelt wird eigentlich auf einen konstanten Massenstrom, der bezogen auf Normdichte einem konstanten Volumenstrom entspricht. Die Formel (3-1) veranschaulicht, dass Schwankungen von Druck(p) und Temperatur(T) durch den Volumenstrom als Funktion der Drehzahl ausgeglichen werden müssen. Die Anlage verfügt somit über eine EFC (elektronic flow control) kombiniert mit einer PDP.

$$\dot{m} = \frac{p * \dot{V}(n)}{R * T} \quad (3-1)$$

Kalibrierverfahren und Gebläse Regelung:

Die EU Verordnung 134/2014 sieht eine Kalibrierung der CVS-Anlage bei erstmaliger Inbetriebnahme und nach größeren Wartungsarbeiten vor. Dies geschieht mit Hilfe eines kalibrierten Volumenstrommessgerätes (z.B. Normventuridüse, Heißfilmanemometer) und eines Drosselorgans. Dabei wird die Fördermenge in Liter/Umdrehung (Normbedingungen) bei verschiedenen Druckdifferenzen ermittelt. Aus den Wertepaaren (V_n/U , dp/p_{abs}), mindestens 6 bis maximal 10, wird dann mittels linearer Regression die Kalibriergerade ermittelt. Die Kalibrierung erfolgt bei konstanter Drehzahl und wird für jede zu erwartende Drehzahl der Solldurchflussmenge durchgeführt. Beispielhaft dargestellt in Abbildung 3-4.

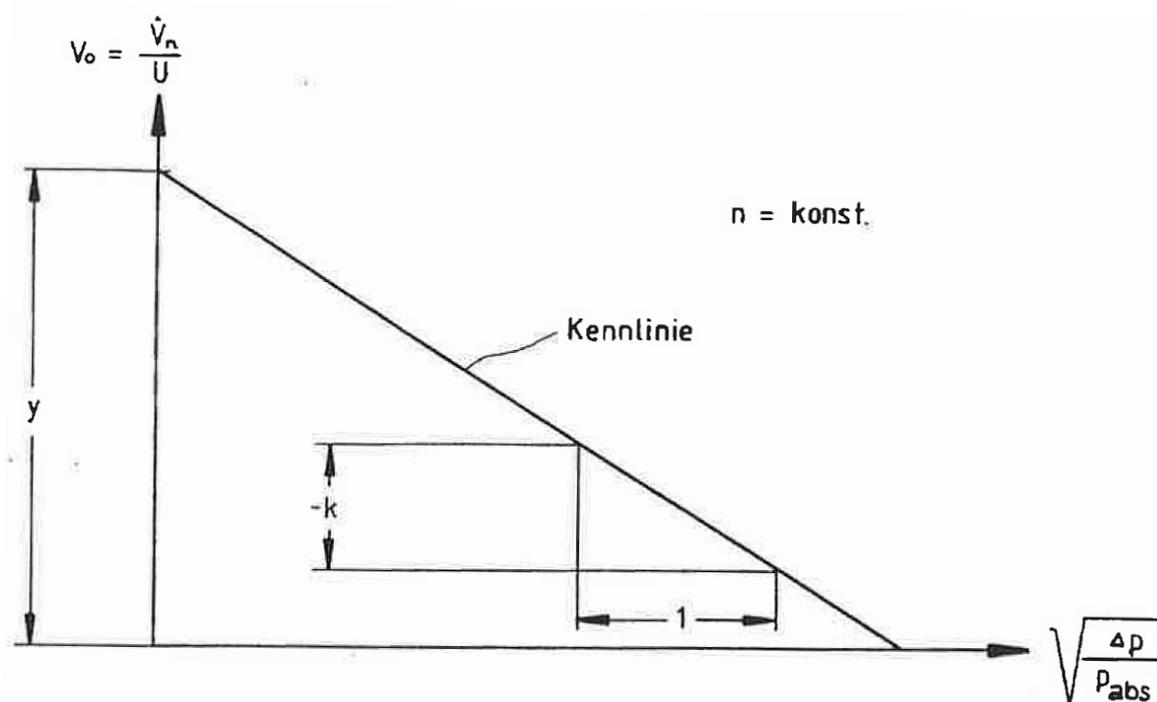


Abbildung 3-4: Kalibriergerade; Δp =Differenzdruck über Gebläse; p_{abs} = Absolutdruck am Gebläseauspuffstutzen [16]

„Bei der Gebläseregelung greift der Rechner auf die abgespeicherten Kennlinien zurück. Aus den Meßwerten Δp , p_{abs} und n mit Berücksichtigung der Abweichung von der Kalibriertemperatur ergibt sich das momentan geförderte Volumen. Da sich insbesondere durch abgasbedingten Temperaturanstieg beträchtliche Abweichungen von der Kalibrierdrehzahl ergeben können, interpoliert das Programm zwischen den einzelnen Kennlinien.

$$\dot{V}_{\text{momentan}} = \frac{\dot{V}_{n \text{ Kennlinie}}}{n_{\text{Kalibrierung}}} * n * \frac{T_{\text{Kalibrierung}}}{T} \quad (3-2)$$

$$V_0 = \frac{\dot{V}_{n \text{ Kennlinie}}}{n_{\text{Kalibrierung}}} \dots \text{interpoliert zwischen den Kennlinien}$$

Als Stellgröße gibt der Rechner die neue Drehzahl nach einem P-Regler-Algorithmus aus. Das Recherausgangssignal zwischen 0 und 5 Volt steuert den Frequenzwandler und somit die Gebläsedrehzahl. Während des Beutelfüllens werden die momentanen Durchflüsse aufsummiert und bei Füllende angezeigt.“ ([16]: S.60)

$$n_{\text{neu}} = n_{\text{alt}} + f * \frac{(\dot{V}_{\text{soll}} - \dot{V}_{\text{momentan}})}{V_0} * \frac{T_{\text{Kalibrierung}}}{T} \quad (3-3)$$

$f = \text{Verstärkungsfaktor}$

Formel (3-3) zeigt die Berechnung der neuen Drehzahl wie sie in der Diplomarbeit von Hans Knapp [16] auftaucht. In selber Form wurde sie auch in die SPS Steuerung übernommen. Der Anteil für die Drehzahländerung kann aus Umformungen der Gleichung (3-2) gewonnen werden, jedoch wäre das Temperaturverhältnis dann genau umgekehrt. Die oben angegebene Formel führt für hohe Abgastemperaturen zu einem kleineren Temperaturverhältnis und damit auch zu einem vermeintlich langsameren Anstieg der neuen Drehzahl. Ob die Formel (3-3) in dieser Form beabsichtigt ist oder unbeabsichtigt, durch fehlerhaftes Umformen, zustande kam ist nicht geklärt.

Die Abbildung 3-5 zeigt wie sehr sich die Drehzahl über den gesamten Zyklus verändert, um die Temperaturschwankungen auszugleichen und den momentanen Normvolumenstrom ($\dot{V}_{\text{momentan}}$) konstant zu halten. Ein besonderes Augenmerk gilt den bleibend hohen Temperaturen ($T > 70^\circ\text{C}$) des verdünnten Abgases, da die Drehzahl der Verdrängerpumpe bei derartigen Temperaturen stark zu schwingen beginnt. Die Schwankungen betragen dabei bis zu 50 U/min. Dies kann zum einen der Regelung des Frequenzumrichters bzw. Elektromotors mit ausschließlich, proportionalem Anteil (P-Regler) geschuldet sein. Zum anderen wird das Rootsgebläse derzeit von einem Asynchronmotor angetrieben, der für die Regelung über den Frequenzumrichter (FU) aufgrund von Grundschwankungen des FUs und zu vielen überlagerten Regelschleifen ungeeignet ist.

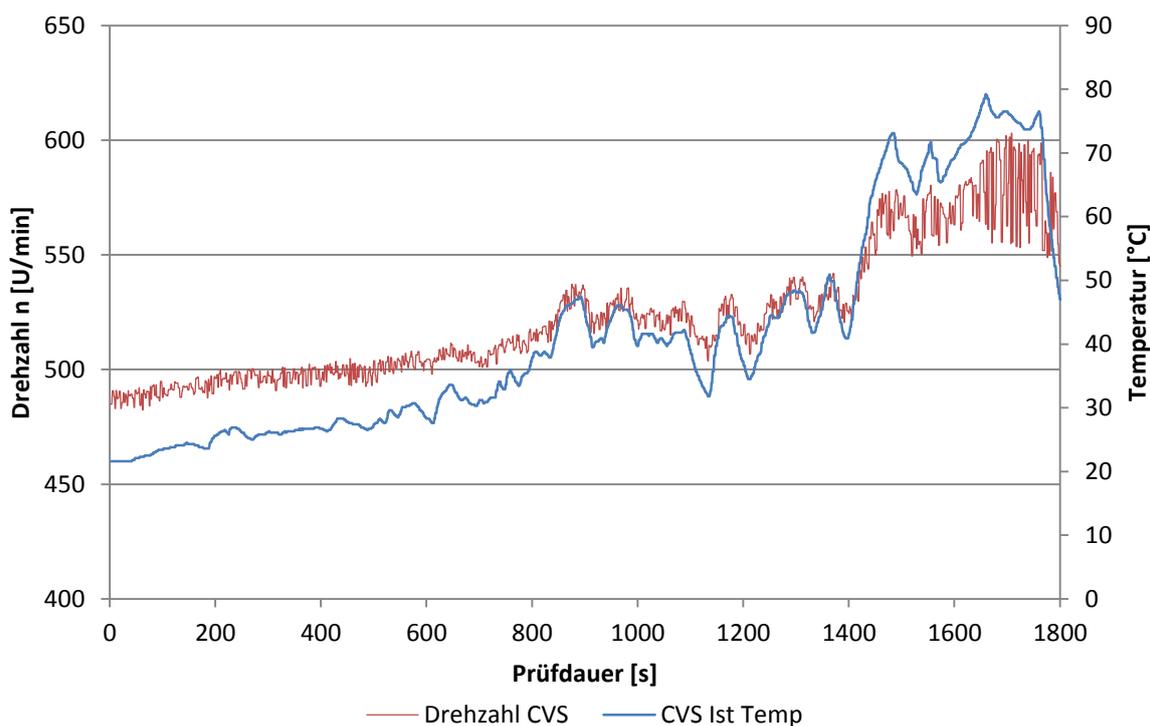


Abbildung 3-5: Temperaturverlauf vor PDP und Drehzahlverlauf der PDP bei einem WMTC 3-2 Zyklus mit einer BMW F800

Hinsichtlich der Kalibrierung und Regelung einer CVS-Anlage mit PDP macht die EU Verordnung 134/2014 folgende Vorgaben:

„Bei einer Abgasemissionsprüfung kann der Nutzer anhand der Messung dieser Pumpenkenngrößen den Durchfluss mit Hilfe der Kalibriergleichung berechnen.“ ([2]: Anhang2, Anl. 4, 2.2.3.)

*„Alle Kenngrößen von Pumpe und Durchsatzmesser, die hintereinander geschaltet sind, werden gleichzeitig gemessen. Der berechnete Durchsatz (angegeben in m^3/min am Pumpeneinlass bei absolutem Druck und absoluter Temperatur) kann dann in Form einer Korrelationsfunktion als Funktion einer bestimmten Kombination von Pumpenkenngrößen dargestellt werden. Dann werden die lineare Gleichung für den Pumpendurchsatz und die Korrelationsfunktion aufgestellt. **Sind bei einer Pumpe einer CVS-Anlage mehrere Antriebsdrehzahlen vorgesehen, dann muss für jeden verwendeten Drehzahlbereich eine Kalibrierung vorgenommen werden.**“* ([2]: Anhang2, Anl. 4, 2.2.1.)

„Bei diesem Kalibrierverfahren werden für die Pumpen- und die Durchsatzmesser-Kenngrößen, die den Durchsatz in jedem Punkt bestimmen, die absoluten Werte gemessen. Es müssen drei Bedingungen eingehalten werden, damit die Genauigkeit und die Stetigkeit der Kalibrierkurve gewährleistet sind:

Die Pumpendrucke sind an den Pumpenanschlüssen und nicht an den äußeren Rohrleitungen an Ein- und Auslass der Pumpe zu messen. Druckanschlüsse am oberen und am unteren Mittelpunkt der Vorderplatte des Pumpenantriebs sind den tatsächlichen Drücken im Pumpenfüllraum ausgesetzt und ermöglichen somit die Messung der Absolutdruckdifferenzen

Während der Kalibrierung muss die Temperatur konstant gehalten werden[...]

Alle Anschlüsse zwischen dem Durchflussmesser und der Pumpe der CVS-Anlage müssen dicht sein.“ ([2]: Anhang 2, Anl. 4, 2.2.)

„2.2.6. Das Drosselventil wird so eingestellt, dass der Durchsatz um einen Schritt (ungefähr 1 kPa) des Unterdrucks am Pumpeneinlass weiter begrenzt wird, wodurch sich **mindestens sechs Messpunkte** für die gesamte Kalibrierung ergeben. Die Anlage muss sich innerhalb von drei Minuten stabilisieren, dann ist die Datenerfassung zu wiederholen.“ ([2]: Anhang 2, Anl.4, 2.2.6.)

„2.2.11 Bei sorgfältiger Kalibrierung dürfen die mit Hilfe der Gleichung berechneten Werte nicht um mehr als 0,5 % von dem Messwert für V_0 abweichen“. ([2]: Anhang 2, Anl.4 2.2.11.)

Die Abbildung 3-6 zeigt die Durchsatzschwankungen der CVS Anlage aufgrund der Abgastemperaturzunahme bei einem WMTC 3-2 Zyklus mit einer BMW F800. Die Temperaturzunahme führt, wie bereits in Abbildung 3-5 dargestellt zur Drehzahlzunahme und steigenden Drehzahlschwankungen, die wiederum zu Durchsatzschwankungen im 3.Zyklusabschnitt von bis zu 300 l_N/min führen.

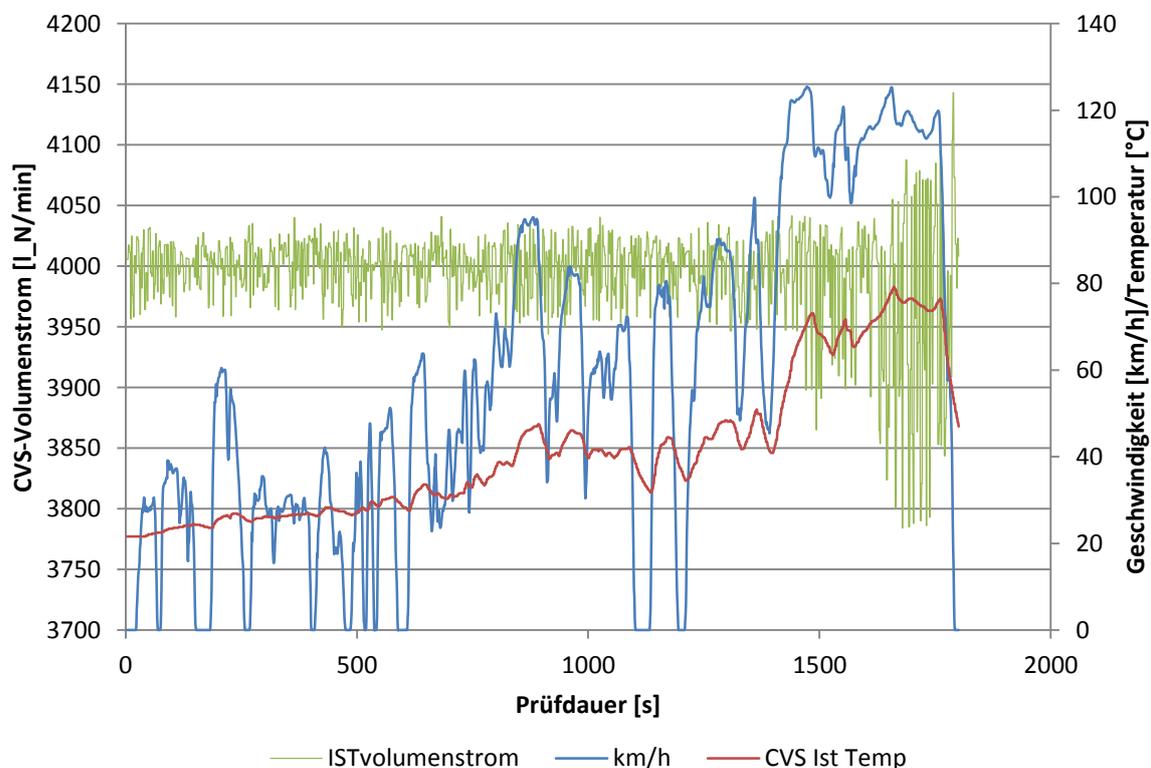


Abbildung 3-6: Temperatur- und CVS-Durchflussverlauf über einen WMTC 3-2 Zyklus mit einer BMW F800

3.3 Proportionaler Probenstrom

Die Regelung des Probenahmestroms des verdünnten Abgases wurde ursprünglich mit einem elektronischen Massenstrommesser und Regelgerät Brooks 5850 Tr durchgeführt.

„Das Massenstrommeß- und -regelgerät Brooks 5850 Tr ist der Abgasbeutelpumpe nachgeschaltet. Es stellt sicher, daß ein konstanter Massenstrom aus dem Meßstutzen des Gebläses in den Abgasbeutel gefördert wird. Daher sind die Beutelkonzentrationen gleich dem Integralwert der Konzentration des Gesamtdurchflusses.“

Das Gerät mißt einerseits den Massenstrom, andererseits hält es ihn durch ein Regelventil konstant. Vorgeschaltet ist ein Feinfilter. Bei abnehmender Fördermenge muß es in einem Ultraschallbad gereinigt werden. Durch Signalvorgabe (0 bis 5 V) vom Rechner aus kann der Durchfluß zwischen 0 und 10 l/min festgelegt werden.“
(S. 53 [16])

Die Wirkungsweise des Massenstrommessgeräts basiert auf dem Messprinzip eines Hitzdrahtanemometers. Abbildung 3-7 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Massenstrommessers. Ohne einen Probenstrom sind die Temperaturen am Fühler 1 und 2 identisch. Strömt nun verdünntes Abgas durch das Messgerät, wird es vom Heizelement erwärmt und infolge dessen steigt auch die Temperatur des stromabwärts gelegenen Fühlers 2. Aus der Temperaturdifferenz zwischen beiden Fühlern kann auf den Massenstrom geschlossen werden.[16]

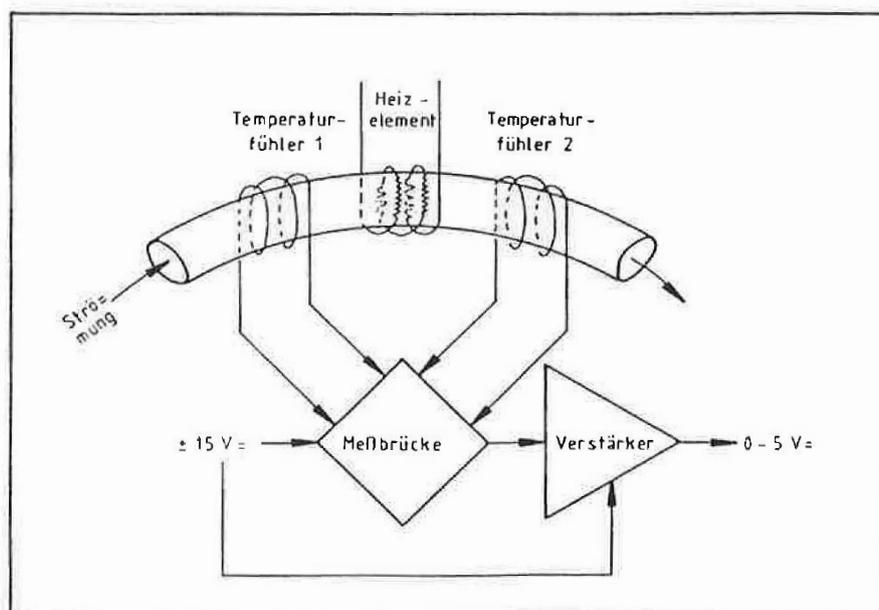


Abbildung 3-7: Wirkungsweise Massenstrommesser und Regelgerät Brooks 5850 Tr [16]

Die Regelung auf einen konstanten Probenmassenstrom garantiert die Proportionalität der Probenahme auch für Temperaturschwankungen und erfüllt somit die Anforderungen der Gesetzgebung [2]. Im Zuge von Umbauarbeiten ist der Brooks 5850 Tr Massenstromregler jedoch durch einen Brooks-Schwebekörper Durchflussmesser mit Nadelventil (Brooks Sho-Rate 1355G) ersetzt worden. Das neue Mess- und Regelorgan, zu sehen in Abbildung 3-8, arbeitet nicht mehr wie das ursprüngliche mit einem Heizelement und zwei Temperatursensoren zur Massenstrombestimmung und Regelung, sondern lediglich mit einem manuell verstellbaren Nadelventil. Der Probenstrom wird zu Beginn des Tests mittels einer Stellschraube für das

Nadelventil manuell eingestellt. Eine Temperaturkompensation während des Testzyklus wird nicht vorgenommen. Ein Schwebekörper Durchflussmesser ist aufgrund der physikalischen Prinzipien seiner Wirkungsweise stark druck- und temperaturabhängig. Ändern sich die Betriebsbedingungen gegenüber den ursprünglichen Kalibrierbedingungen, zeigt das Durchflussmessgerät einen falschen Wert an. In diesem Fall muss ein sog. Korrekturfaktor zur Anwendung gebracht werden. Für Temperaturänderungen errechnet sich dieser nach Gleichung (3-4).

$$K_T = \sqrt{\frac{T_K}{T_B}} \quad (3-4)$$

K_T ist er Korrekturfaktor für Temperatur, mit der der Skalenwert multipliziert werden muss. T_K ist dabei die Temperatur mit der das Gerät ursprünglich kalibriert wurde, T_B die aktuelle Betriebstemperatur. Beide werden in Kelvin angegeben. Dies ergibt bei einer Kalibriertemperatur von 25 °C wie auf den Brooks SHO-RATE (Abbildung 3-8) angegeben und tatsächlichen Betriebstemperaturen von über 70 °C (vgl. Abbildung 3-6) einen Korrekturfaktor von $K_T=0,93$. Dies bedeutet eine tatsächliche Probenstromabnahme von 7%. Betrachtet man die Proportionalität beutelweise, so ist die Temperatur bei Füllbeginn von Beutel 3 bereits höher, die Abweichung liegt dabei knapp unter 5%, womit die Forderung von einer maximalen Abweichung des Startverhältnisses von +/-5% nach [2] (Anhang2, 4.5.3.12.1.2.) gerade noch eingehalten wird. Eine aktive elektronische Temperaturkompensation, wie im ursprünglichen System ist deshalb zu bevorzugen, um eine kontinuierlich proportionale Probennahme zu gewährleisten.



Abbildung 3-8: Schwebekörper-Volumenstrommesser und Regler Brooks SHO-RATE 1355G

Verdünnungsluft Probenstrom

Für die Verdünnungsluft ist eine einfache Art der Probenstromregelung ausreichend, da mit keinen bzw. nicht relevanten Veränderungen der Umgebungsbedingungen sowie der Konzentrationszusammensetzung der Verdünnungsluft während des Prüflaufs zu rechnen ist. Man vergleiche dazu die Verordnungsauszüge in Kapitel 2.4. Der Probenstrom für die Verdünnungsluft wird bei der derzeitigen Anlage nicht in der Nähe des Auffangtrichters entnommen, wie es eigentlich die Vorschrift verlangt, sondern aus einer kleinen Öffnung im CVS-Schrank. Da die Öffnung jedoch in Strömungsrichtung hinter dem Fahrzeug und dem Auffangtrichter angeordnet ist, könnten im Falle von nicht aufgefangenen oder überströmenden Abgasen diese als erhöhte Hintergrundkonzentrationen in der Verdünnungsluft detektiert werden. Auf diese Art und Weise wird eine 100%ige Absaugung überprüft.

3.4 Analysegerät AVL AMA i60 D1

Zur Analyse der Abgasbeutel und der modalen Messung des verdünnten Abgases ist das Abgasanalysegerät AVL AMA i60 D1 (1 stream diluted) im Einsatz. Ein beispielhafter Messschrank ist in Abbildung 3-9 dargestellt.



Abbildung 3-9: AVL AMA i60 [17]

Die in der AMA des Zweiradrollenprüfstands verwendeten Analysatoren und deren mögliche sowie momentan angewandte Messbereiche sind in Tabelle 3-1 aufgelistet.

Tabelle 3-1: Analysatoren der AMA i60 D1 für P7

Analysator	Komponente	Probegas Konditionierung	Messbereiche (möglich)	Messbereiche (angewandt)
IRD i60 CO2 H	CO2	Taupunkt < 30°C Partikel < 5 µm Rate ~ 60 l/h	Lowest: 0-0,5 [Vol%] Highest: 0-20 [Vol%]	MB2: 0-1 [Vol%] MB3: 0-3,5 [Vol%]
IRD i60 CO L	CO	Taupunkt < 30°C Partikel < 5 µm Rate ~ 60 l/h	Lowest: 0-50 [ppm] Highest: 0-5000 [ppm]	MB2: 0-350 [ppm] MB3: 0-1100 [ppm] MB4: 0-3500 [ppm]
Cutter FID i60 LCD	THC	Taupunkt < 30°C Partikel < 5 µm Rate ~ 100 l/h	Lowest: 0-3 [ppm] Highest: 0-1000 [ppm]	MB2: 0-50 [ppm] MB3: 0-100 [ppm] MB4: 0-1000 [ppm]
	CH4		Lowest: 0-9 [ppm] Highest: 0-3000 [ppm]	MB2: 0-100 [ppm]
CLD i60 LC	NO,NOx	Taupunkt < 30°C Partikel < 5 µm Rate ~ 80 l/h	Lowest: 0-3 [ppm] Highest: 0-1000 [ppm]	MB2: 0-60 [ppm] MB3: 0-300 [ppm] MB4: 0-1000 [ppm]

Die tatsächlich angewandten Messbereiche hängen von den zur Verfügung stehenden Kalibriergasen ab. Demnach sind bei allen Analysatoren noch kleinere Messbereiche möglich. Die Kalibriergase sind für alle im Prüfstandsgebäude untergebrachten AMAs dieselben und sind im Gaslager untergebracht. Momentan ist keine Anschaffung von Kalibriergasen mit niedrigerer Konzentrationen angedacht.

Die momentan verwendete AMA und ihre Analysatoren sind für die Analyse von stark verdünntem Abgas konzipiert und benötigen deshalb keine zusätzliche Beheizung. Stark verdünnt beschreibt in diesem Fall, dass der Taupunkt des verdünnten Abgases auf jeden Fall unterhalb der Umgebungstemperatur liegt. Somit wird sichergestellt, dass kein Wasser auskondensieren kann und die Konzentration der gemessenen Abgaskomponenten verfälschen würde. Dennoch gilt es zu überprüfen, ob der Wassergehalt im Abgas keine zu großen Quereinflüsse auf die Analysatoren hat, dies gilt besonders für die CO und CO₂ Messung.[17]

Laut den Datenblättern der aktuell verbauten Analysatoren muss das Probengas einen Taupunkt <30°C besitzen und nur Partikel ≤5µm enthalten. Bei einem durchschnittlichen Verdünnungsgrad von DF=6 ist dies für das Messgas aus den Beutelproben erfüllt. Bei modaler Messung treten jedoch wesentlich geringere Verdünnungsgrade auf, wodurch sich kurzzeitig ein höherer Taupunkt einstellt. Genaueres siehe Kapitel 3.6 Kondensationsbetrachtungen.

Bevor das Messgas der Beutelproben sowie das für die modale Messung in die Analysatoren gelangen, wird es von der AMA internen GPU (Gas Preparation Unit) konditioniert. Abbildung 3-10 zeigt symbolisch eine GPU.



Abbildung 3-10: GPU einer AVL AMA i60 [17]

„Aus verschiedenen Gründen muss die Konditionierung der Messgase auf unterschiedlichen Temperaturniveaus erfolgen. Die folgende Tabelle [hier Tabelle 3-2] zeigt einen Überblick:“ ([17]: 57)

Tabelle 3-2: Messgastemperaturen ([17]: S.57)

Messgas Temperatur	Anwendung	Anmerkungen
Taupunkt 4 °C	Rohabgas trocken	Entfernen von Wasser aus dem heißen Messgas, um Störeinflüsse zu vermeiden: <ul style="list-style-type: none"> • Wasser in IRD i60-Analysatoren • Kondensat in CLD i60- und IRD i60-Analysatoren
20 ... 40 °C	Verdünnte Messung	Für SULEV-Anwendungen T \geq 35 °C

Die Abbildung 3-11 zeigt den Fließplan für die Analyse von „stark“ verdünntem Abgas (nicht kondensierendem Messgas). „Das Messgas wird von einer "kalten" Pumpe in den Messschrank gefördert. Falls eine "heiße" Pumpe nahe dem Messpunkt notwendig ist, wird ein externes Modul eingesetzt. Die Druckregelung für das Messgas sitzt am Ende der Linie hinter dem letzten Analysator, [...]“ ([17]: S. 67)

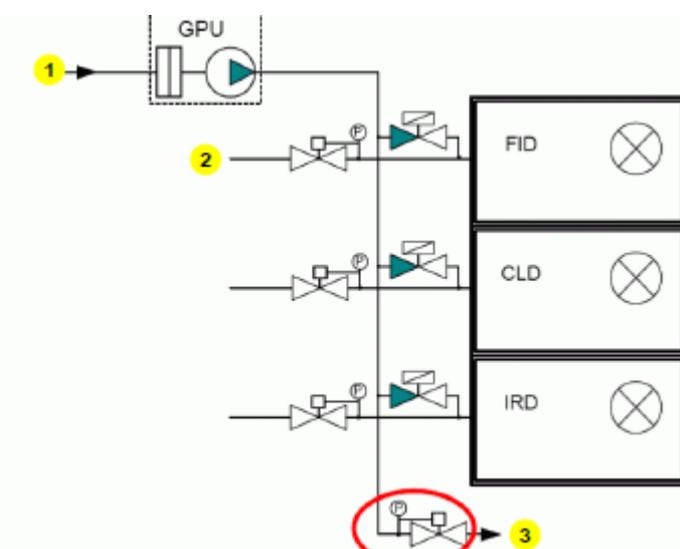


Abbildung 3-11: Fließplan für verdünntes Abgas; 1=Messgas; 2=Nullgas/Kalgas; 3=Absaugung [17]

Mit immer niedriger emittierenden Fahrzeugen wird auch eine immer geringere Verdünnung der Abgase angestrebt, um so die Konzentration der Abgaskomponenten in den Beuteln zu erhöhen. Durch die Mischung der feuchten Abgase mit weniger, trockenerer Verdünnungsluft steigt jedoch der Taupunkt. Genaueres siehe Kapitel 3.6 Kondensationsbetrachtungen. Um geringere Verdünnungsgrade realisieren zu können, muss die CVS-Anlage und die AMA beheizt werden. Die Abbildung 3-12 zeigt den Fließplan einer AMA i60 mit SULEV-Option für verdünnte Abgase.

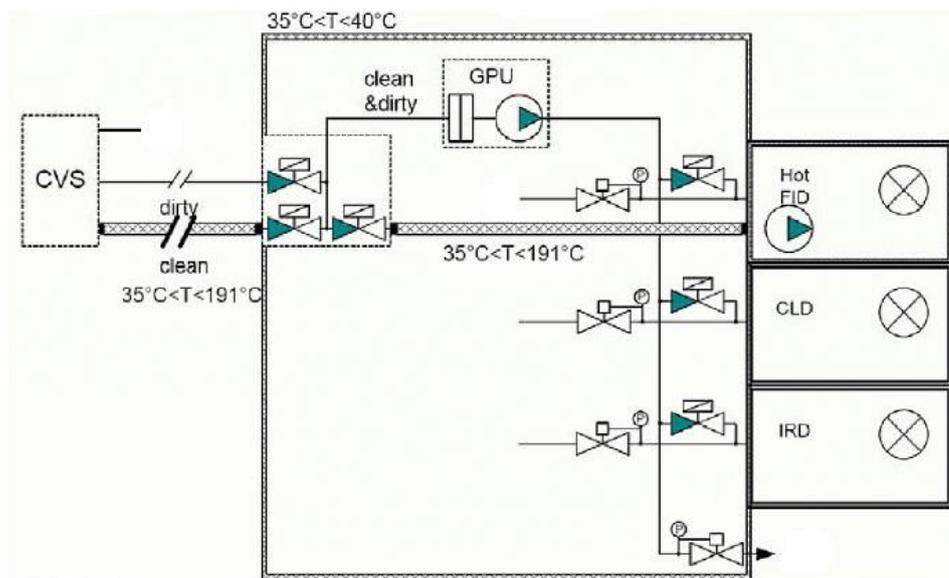


Abbildung 3-12: Fließplan für SULEV-Option [17]

„Es sind nicht nur beheizte Leitungen von der CVS zur Abgasmessanlage erforderlich, und eine gewisse Mindesttemperatur innerhalb der Abgasmessanlage, sondern die CVS selbst inklusive der Abgasbeutel muss auf einem erhöhten Temperaturniveau gehalten werden. Eine Mindesttemperatur von 35 °C ist ausreichend, um den Ausfall von Kondensat zu verhindern.“ ([17]: S.69)

Der Taupunkt für Rohabgas liegt abhängig vom Luftverhältnis und dem verwendeten Kraftstoff zwischen ca. 40 und 55 °C. ([3]: S.529) Nach der Verordnung EU 134/2014 wird Kondenswasserbildung im Allgemeinen vermieden, wenn der verdünnte Abgasvolumenstrom dem doppelten des maximalen Rohabgasstromes entspricht, also ein minimaler momentaner Verdünnungsfaktor von $DF=2$ vorliegt. Der Taupunkt für verdünntes Abgas mit $DF=2$ liegt, nach Berechnungen in Kapitel 3.6, bei ca. 40 °C ($\lambda=1$, Verdünnungsluft $T=25^\circ\text{C}$ und $\varphi=50\%$). Berücksichtigt man, dass es auf dem Weg vom Auspuff bis zum Analysator auch noch zur Mischung mit weniger feuchtem, verdünntem Abgas in den Leitungen kommt und ein $DF_{\min}=2$ unter Umständen gar nicht erreicht wird, ist davon auszugehen, dass eine Beheizung der AMA auf 35-40°C ausreichend ist.

Die Beheizung der Messkette auf 191°C ist für HC bei modaler Messung (sowohl bei Roh- als auch bei verdünntem Abgas) und bei Verwendung von Dieseldieselkraftstoff nötig, da es zum Kondensieren von schweren Kohlenwasserstoffen kommen kann (bereits ab 170°C). Das Kondensat lagert sich an der Leitungswand ab und würde somit nicht vom Analysator erfasst werden, zudem kann es durch späteres Abdampfen nachfolgende Messungen mit geringen Konzentrationen verfälschen. Man spricht dabei vom sog. „HC-Hang-up“.[3]

3.5 Fehleranalyse

In diesem Kapitel wird eine Fehleranalyse für die Emissionsermittlung mit einer CVS-Anlage durchgeführt. Die Ergebnisse beruhen auf einer Studie aus dem Jahre 2002, worin untersucht wurde, ob mit einer herkömmlichen CVS-Anlage auch SULEV-Limits mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden können. Ziel ist es die größten Fehlerursachen aufzuzeigen, um Maßnahmen dagegen ergreifen zu können. Für genauere Berechnungen und weiterführende Informationen wird auf das zuvor erwähnte Paper „Studies on Enhanced CVS Technology to Achieve SULEV Certification“, H.Behrendt and O.Mörsch, 2002 [13] verwiesen. Grundsätzlich wird zwischen systematischen und statistischen Fehlern unterschieden.

a) Systematischer Fehler bei der Berechnung des DF

Der systematische Fehler des Verdünnungsfaktors beruht auf zwei vereinfachten Annahmen, die bei dessen Berechnung nach [2] gemacht werden.

$$DF = \frac{X}{CO2_{CVS} + CO_{CVS} + HC_{CVS}} \quad (3-5)$$

Die obige Gleichung (3-5) ist nur eine gute Annäherung an den realen Verdünnungsfaktor (DR) der nach Gleichung (3-6) berechnet werden kann.

$$DR = \frac{V_{CVS}}{V_{Abgas}} = \frac{V_{CVS}}{V_{CVS} - V_{Luft}} \quad (3-6)$$

Die Annäherung geschieht über eine Kohlenstoffbilanz, bei der zum einen von einer stöchiometrischen Verbrennung ausgegangen wird und damit von einer Kohlendioxidkonzentration von $X = 13,4$ [Vol%]. Die Werte für weitere Brennstoffe sind in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tabelle 3-3: CO₂ Anteile in [Vol%] bei $\lambda=1$ [2]

Kraftstoff	X
Ottokraftstoff (E5)	13,4
Diesekraftstoff (B5)	13,5
Flüssiggas	11,9
Erdgas/Biomethan	9,5
Ethanol (E85)	12,05

Für magere Verbrennungskonzepte $\lambda > 1$ steigt der Fehler durch die Annäherung des Verdünnungsfaktors mittels Gleichung (3-5) und kann für extrem niedrige Emissionslevel sogar zu negativen Emissionsergebnissen führen. Dennoch ist der Fehler für annähernd stöchiometrischen Motorbetrieb vernachlässigbar klein [13]. Negative Ergebnisse werden laut Verordnung gleich Null gesetzt.

Eine weitere Vereinfachung die auch bei stöchiometrischer Verbrennung zu Fehlern in der Berechnung des Verdünnungsfaktors nach Gleichung (3-5) führt, ist die Vernachlässigung der Hintergrundkonzentration von CO, HC und CO₂ in der Verdünnungsluft. Eine Konditionierung der Hintergrundluft kann mittels Aktivkohlefilter die HC Emissionen verringern, die CO₂ Konzentration bleibt jedoch unverändert.

b) Statistische Fehler Aufgrund von Messungenauigkeiten

Bei der Berechnung der tatsächlichen Emissionsmasse nach Gleichung (3-7) (hier am Beispiel von HC) sind alle in der Gleichung enthaltenen Messgrößen mit einem Messfehler behaftet.

$$m_{HC} = \frac{1}{5} V_{CVS} \rho_{HC} (HC_{CVS} - HC_{Luft} \left(1 - \frac{1}{DF}\right)) \quad (3-7)$$

Die Abbildung 3-13 zeigt eine Zusammensetzung des statistischen Gesamtfehlers für die gewichtete Emissionsmasse von 6 mg/mi für ein typisches SULEV-Fahrzeug.

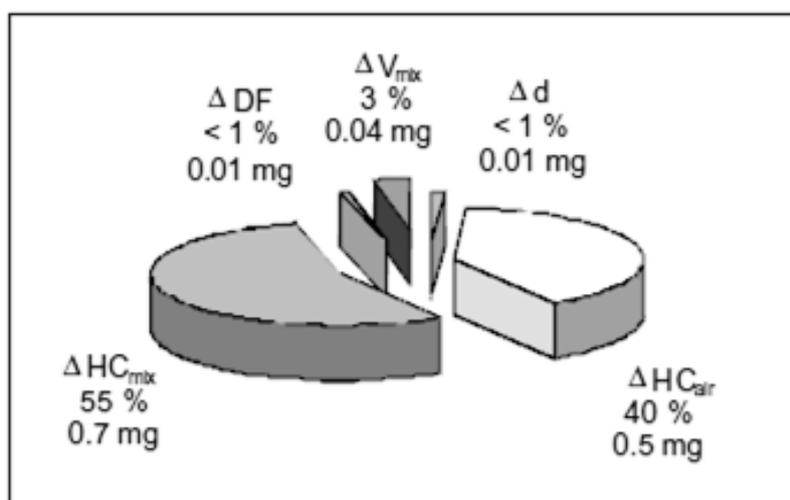


Abbildung 3-13: Zusammensetzung des statistischen Gesamtfehlers ($\Delta m_{HC_e} = \pm 1,3 \text{ mg/mi} = 100\%$) bei gewichteter Emissionsmasse von 6 mg/mi bei FTP75 [13]

Der theoretische Gesamtfehler für die HC Massenberechnung setzt sich hauptsächlich aus der Konzentrationsmessung der Luft- und Abgasbeutel zusammen. Der darin auftauchende Fehler für den Verdünnungsfaktor beruht auf der Unsicherheit der CO₂ (und CO, HC) Messung und hat nichts mit dem zuvor beschriebenen systematischen Fehler zu tun. [13]

Der errechnete Messfehler liegt jedoch deutlich über den tatsächlich auftretenden Fehlern, da „state of the art“ Analysatoren weitaus genauer messen als von den Herstellern spezifiziert. [13] Um den statistischen Fehler dennoch möglichst gering zu halten sollten nach [13] folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Das Gesamtvolumen durch die CVS-Anlage verringern, um die Schadstoffkonzentration im verdünnten Abgas zu erhöhen und gleichzeitig den Fehler bei der Emissionsmassenberechnung durch optimale Verdünnung zu verringern
- Die Genauigkeit der Analysegeräte zur Messung der Schadstoffkonzentration der verdünnten Abgase und der Verdünnungsluft verbessern, durch beispielsweise eine Anpassung des Messbereichs
- Die Hintergrundkonzentration der Verdünnungsluft verringern

Die Verringerung der Hintergrundkonzentrationen führt in nahezu gleichem Ausmaß auch zu einer Verringerung der Beutelkonzentrationen des verdünnten Abgases. Jedoch erhöht sich das Verhältnis der Beutelkonzentrationen von Abgas und Verdünnungsluft, was wiederum einen positiven Einfluss auf die Gaußsche Fehlerfortpflanzung hat [11]. Siehe dazu Abbildung 3-14

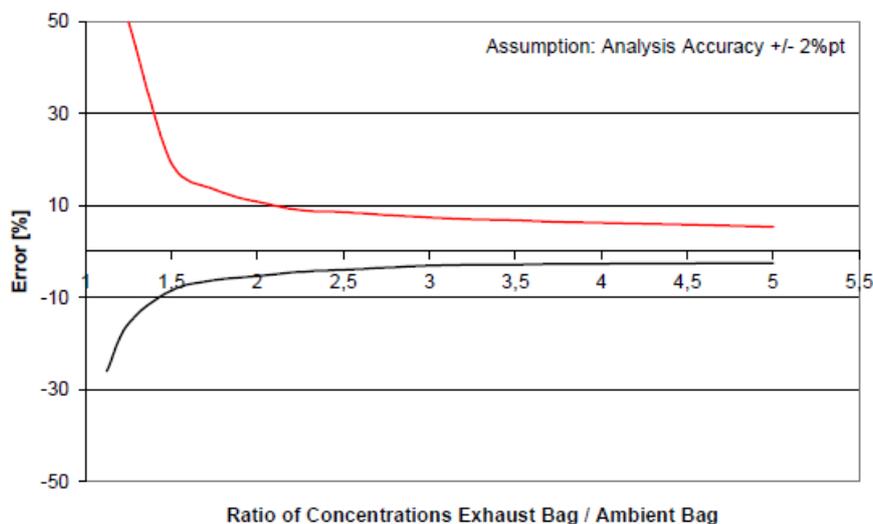


Abbildung 3-14: Einfluss des Konzentrationsverhältnisses auf die Ergebnisqualität [11]

Zu sehr ähnlichen Ergebnissen ist die Arbeit „Grundlegende Untersuchungen zur Nutzung der CVS-Messtechnik für niedrig emittierende Fahrzeuge mit Ottomotoren“ MTZ 61 (2000) 2, S.106 gekommen.

1. Die Anpassung der Messbereiche für zum Beispiel HC von 30 auf 3 ppm_{C₃H₈} ist Voraussetzung für die Messunsicherheit.
2. Eine hohe Reproduzierbarkeit der Analysatoren zusammen mit einer konstanten HC-Hintergrundkonzentration sind einer aufwendigen Verdünnungsluftreinigung kombiniert mit Analysatoren für niedrigste Konzentrationen vorzuziehen.
3. Voraussetzung für die notwendige Reduzierung der Verdünnung in der CVS-Anlage ist die Beheizung des gesamten Systems ([12]:S.115)

3.6 Kondensationsbetrachtungen

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Maßnahmen, insbesondere die Reduzierung des Verdünnungsgrades zur Steigerung der Beutelkonzentrationen, stehen im Widerspruch zu einer angestrebten hohen Verdünnung zur Vermeidung von Kondensation. Um diesen Konflikt zu lösen, können folgende Maßnahmen getroffen werden.

„1. Trocknung der Verdünnungsluft

Eine Trocknung der Verdünnungsluft ist nur bedingt nutzbar, da bei einer Verdünnungsluftfeuchte von etwa 8 g/kgL.,tr. Nur etwa 6 g/kgL.,tr. entfernt werden können. Schon eine Temperaturerhöhung von 22 °C auf 27 °C hat aber den gleichen Effekt. Eine Trocknung ist dann sinnvoll, wenn die Verdünnungsluft extrem feucht ist oder eine Beheizung der Anlage nicht in Frage kommt.

2. Beheizung

a: sämtlicher abgasführender Elemente

b: Abgasbeutel

Durch Beheizung kann der Verdünnungsfaktor jedoch nicht beliebig gesenkt werden. Im Grenzfall (CVS-Durchsatz entspricht maximalem rohen Abgasvolumenstrom) sollte die Anlage für Benzinmotoren auf mindestens 55 °C beheizt sein. Die Wasserkonzentrationen im Abgas schwanken dann aber zwischen etwa 10 und 100 g/kgL.,tr.. Da bestimmte Analysatoren eine Wasserquerempfindlichkeit haben, wirken sich schwankende Wasserkonzentrationen bei modalen Messungen auf die Messergebnisse aus. Deshalb ist aus Sicht der Analytik ein möglichst konstanter Wassergehalt im Abgas, das heißt eine hohe Verdünnung wünschenswert.

Die generelle Notwendigkeit einer Anpassung der Verdünnungsverhältnisse bei Messungen niedrig emittierender Fahrzeuge wird durch eine Fehlerabschätzung deutlich.“ [12]

Besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich Kondensation ist jenen Prüfzyklen zu widmen, bei denen hohe Abgasströme emittiert werden und gleichzeitig eine geringe Verdünnung vorliegt. Bei CVS Anlagen mit konstantem Volumenstrom in allen Phasen entspricht dies der Phase 3 des WMTC 2 und 3. Siehe dazu Abbildung 3-15.

„Anmerkung 4: Wird bei einer Prüfung, die niedrige und hohe Geschwindigkeiten (d. h. die Zyklen Teil 1, 2 und 3) umfasst, durchgängig eine Probenahmeeinrichtung mit konstantem Volumen (constant volume sampler, CVS) verwendet, ist dem höheren Risiko des Kondensierens von Wasser im Hochgeschwindigkeitsbereich besonderes Augenmerk zu widmen.“ (4.5.3.11. [2])

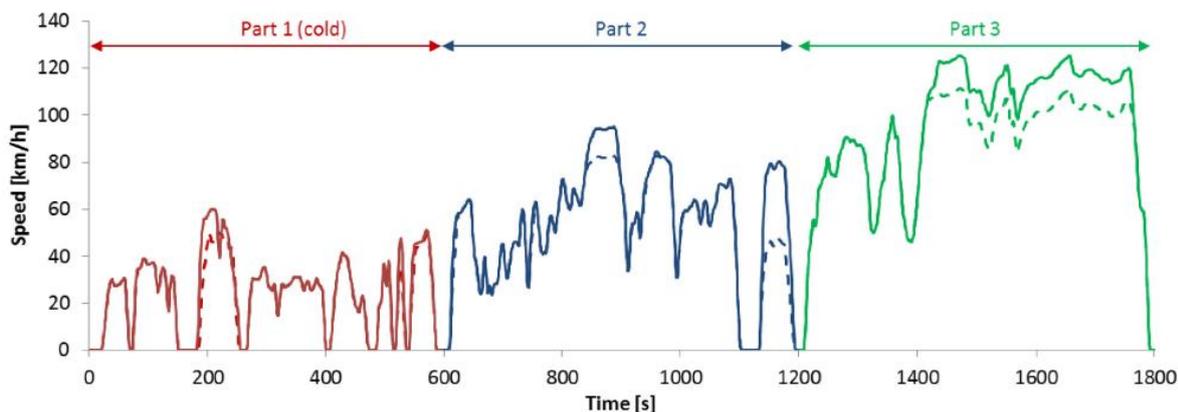


Abbildung 3-15: WMTC 2 und WMTC 3 inklusive reduzierter Höchstgeschwindigkeiten [4]

Abbildung 3-15 zeigt das Geschwindigkeitsprofil des WMTC 2 und 3. Die nachfolgende Tabelle 3-4 zeigt die Zunahme des durchschnittlichen Abgasvolumenstroms und damit die verbundene Abnahme des Verdünnungsfaktors bei Zyklusphasen mit höherer Geschwindigkeit.

Tabelle 3-4: Testergebnisse aus Messung einer Ducati Monster (1198 ccm) vom 22.09.2016

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
DF [-]	13,8	10,4	6,1
Q_Abgas_average [l_N/min]	290	383	685

Aus diesem Grund wurde für eine breite Auswahl vorliegender und am P7 durchgeführter Messungen eine Berechnung der relativen Feuchte in den Abgasbeuteln durchgeführt. Dabei wurde eine stöchiometrische Verbrennung mit $\lambda=1$ zugrunde gelegt und der Verdünnungsfaktor DF anhand der vorliegenden Emissionen nach Gleichung (3-5) berechnet. Das H/C Verhältnis des Kraftstoffs wurde konservativ mit 1,875 angenommen (C_8H_{15}). Es wurde davon ausgegangen, dass sich der Beutel wieder den Umgebungsbedingungen angleicht. Zur Veranschaulichung ist ein Flussbild für die Kondensationsberechnung in Abbildung 3-16 dargestellt.

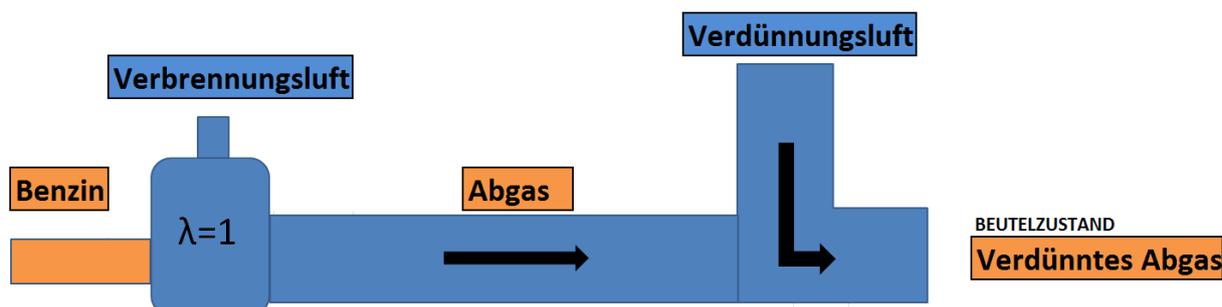


Abbildung 3-16: Flussbild für Kondensationsberechnung

Wie in Tabelle 3-5 zu sehen, ist rein rechnerisch bei 3 bereits durchgeführten Versuchen Kondensation im Beutel aufgetreten. Die Beutelwerte entsprechen jedoch jenen über den gesamten Zyklusteil gemittelten Werten. In Beschleunigungsphasen ist der Verdünnungsfaktor deutlich geringer und somit die momentane, relative Feuchte- und Taupunkttemperatur deutlich höher. Ein Auskondensieren erfolgt somit schon viel früher an kühlen Stellen der Verdünnungs- oder Probenahmeleitungen. Der extrem hohe Verdünnungsgrad von $DF=48$ bei der Messung des Piaggio 125 Sprint führt zu nahezu gleichen Konzentrationen im Verdünnungsluft- und Abgasbeutel.

Tabelle 3-5: Kondensationsrisiko in den Beuteln durchgeführter Messungen

Fahrzeug	Ducati Hypermotard	Ducati Scrambler	Ducati Monster	Piaggio Vespa	Piaggio 125 Sprint
Hubraum [cm ³]	937	400	1198	300	124
Test	WMTC 3-2	WMTC 3-2	WMTC 3-2	WMTC 2-2	WMTC 1
Datum	27.07.2016	21.07.2016	22.09.2016	16.01.2017	04.10.2016
Umgebungsbedingungen					
Temperatur [°C]	24	23,1	23	20,5	23,8
Luftdruck [mbar]	981,1	979,2	982,7	979,6	981,3
rel. Feuchte [%]	49,6	42,6	28,1	28,9	28
Test-Phase	3	3	3	2	1
DF	6,8	7,2	6,1	14,7	48,0
Beutel					
Rel. Feuchte [%]	110,4	102,8	100,3	63,7	36,7
Taupunkt-Temperatur [°C]	25,7	23,6	23,1	13,4	8,1

Der theoretisch mögliche minimale durchschnittliche Verdünnungsgrad ergibt sich aus der Forderung, dass das gesamte Abgas aufgefangen werden muss. Anders ausgedrückt: der modale Verdünnungsgrad muss immer größer als 1 sein, $DF_{\text{modal}} > 1$. Die Tabelle 3-6 zeigt den daraus resultierenden minimalen durchschnittlichen Verdünnungsgrad für zwei verschiedene Fahrzeuge und Zyklen.

Tabelle 3-6: Theoretisch minimaler durchschnittlicher Verdünnungsgrad

Fahrzeug	BMW F800 (800ccm)	Peugeot Speedfight 3 (50ccm)
Testzyklus	WMTC-2	ECE R47
Abgas_max [l _N /min]	1024	387
Abgas_average [l _N /min]	394	160
DF_ave_min	2,60	2,42

Dies entspricht jedoch einem rein theoretischen Wert. Wie bereits zuvor erwähnt, würde dies zu starken Wasserkonzentrationschwankungen führen, was zu einer Querbeflussung der Analysatoren führt und damit wiederum zu einer negativen Beeinflussung der Messgenauigkeit [12]. Des Weiteren kann aufgrund anderer Fahrzeuge und aggressiverer Fahrzyklen das Verhältnis von Abgas_max zu Abgas_average weiter ansteigen. Ein derartig niedriger durchschnittlicher Verdünnungsgrad würde ein exzessives Beutelbeheizen erfordern, das wie später erklärt, vermieden werden sollte. Zudem sollte ein gewisser Sicherheitspuffer eingeräumt werden. In Anlehnung an Kapitel 2.3 und den nachfolgenden Kondensationsbetrachtungen wird ein minimaler durchschnittlicher Verdünnungsfaktor von $DF=6$ als realistisch angesehen und angestrebt.

Abbildung 3-17 zeigt die benötigte Temperatur als Funktion des Verdünnungsfaktor DF, um Kondensation in den Beuteln und in den Verdünnungsleitungen zu vermeiden. Dabei wurde für die Verdünnungsluft eine absolute Feuchtigkeit von $8 \text{ [g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}]$ bzw. $2 \text{ [g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}]$ (bei Verwendung eines Verdünnungslufttrockners) angenommen. Die höhere Temperatur für die Rohrleitung rührt daher, dass während Beschleunigungsphasen das verdünnte Abgas sehr viel feuchter sein kann als im „gemittelten Beutel“ und es somit sehr viel schneller/bereits bei höheren Temperaturen zur Kondenswasserbildung kommen kann. Ein exzessives Beheizen der Beutel über $30 \text{ }^\circ\text{C}$ sollte jedoch aufgrund des sog. „out-gassing“ von Kohlenwasserstoffen aus dem Beutelmateriale vermieden werden [13]. Abbildung 3-18 zeigt den Einfluss der Beheizung und der Vorkonditionierung von Beuteln auf das „out-gassing“.

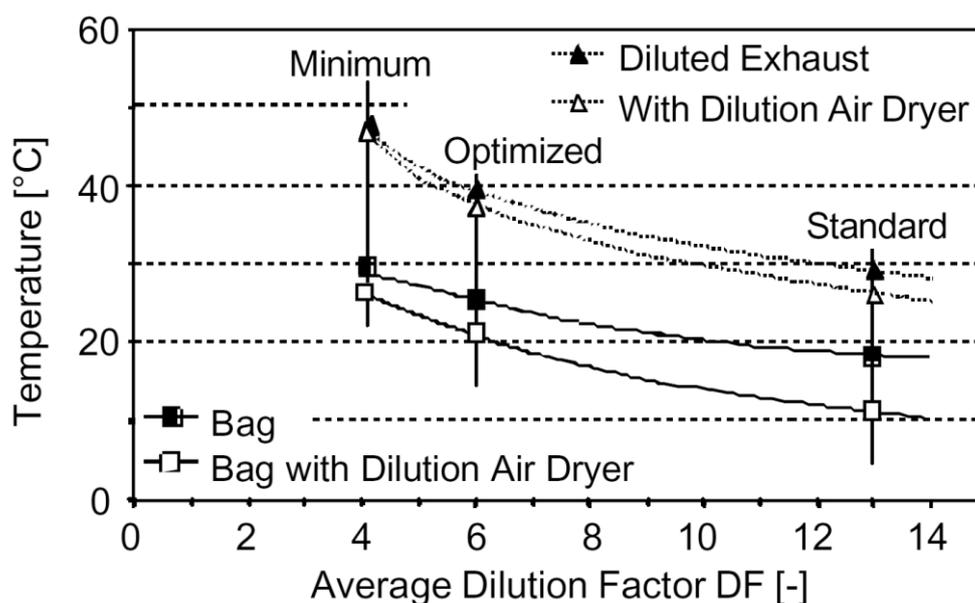


Abbildung 3-17: Temperatur, um Wasserkondensation in den verdünnten Abgasleitungen und Beuteln zu verhindern, als Funktion von DF [13]

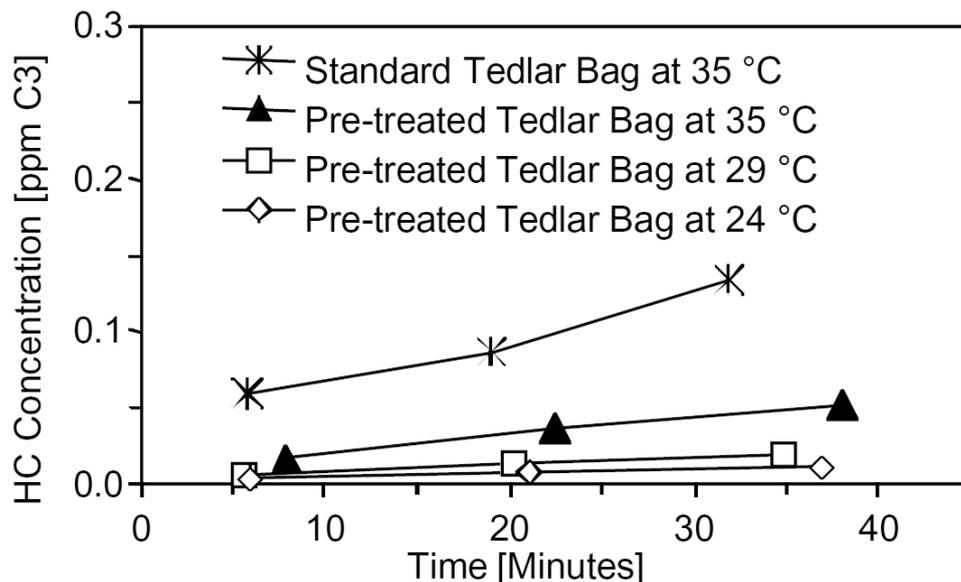


Abbildung 3-18: „Out-gassing“ von Tedlar Beuteln bei verschiedenen Temperaturen (gefüllt mit synthetischer Luft)[13]

Abbildung 3-19 zeigt, dass das Beheizen der Beutel besonders bei feuchter Verdünnungsluft einen deutlich geringeren Verdünnungsgrad ermöglicht. Wie in Tabelle 3-5 ersichtlich, sind relative Luftfeuchten von über 50% im Sommer durchaus möglich. Ein minimaler durchschnittlicher Verdünnungsgrad von 6 ist demnach nur durch Beheizung realisierbar. Eine maximale zulässige, relative Feuchte des verdünnten Abgases von 80% wird aus Sicherheitsgründen vorausgesetzt, dies entspricht in etwa einem Sicherheitsabstand von 4 K zur jeweiligen Taupunkttemperatur.

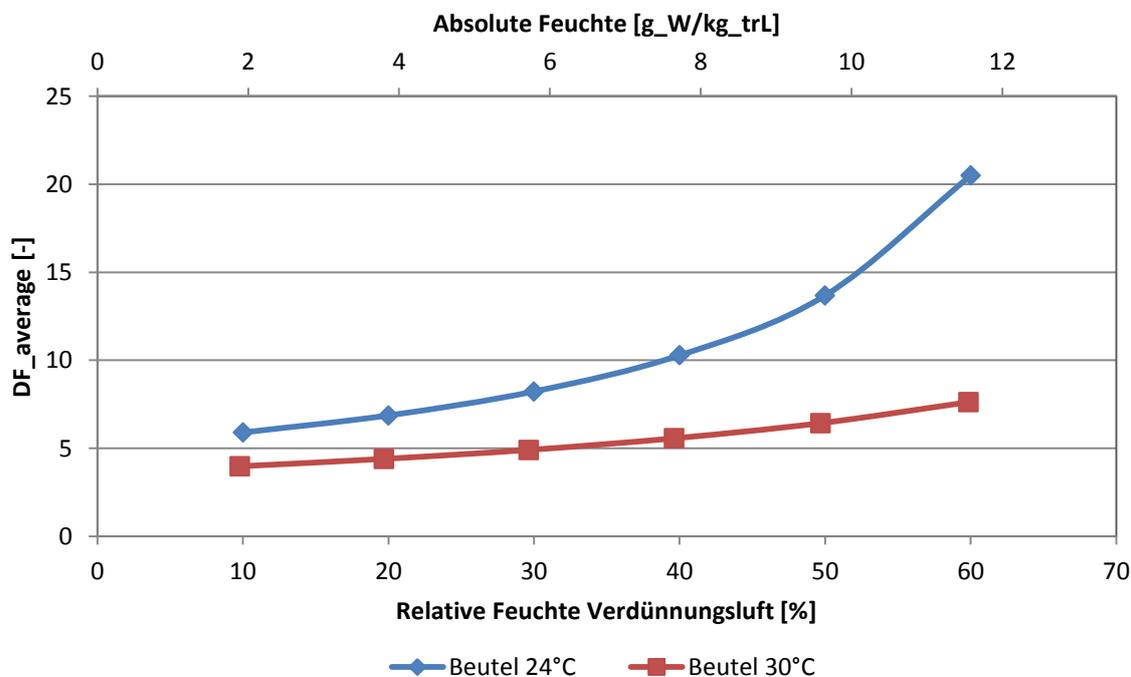


Abbildung 3-19: Benötigter DF für eine relative Feuchte im Beutel von $\phi=80\%$, bei $T_{\text{Luft}}=24^{\circ}\text{C}$ und $p_{\text{Luft}}=980\text{ mbar}$

Vergleiche von durchgeführten Messungen zeigen, dass während Beschleunigungsphasen der

Abgasvolumenstrom gegenüber dem durchschnittlichen Abgasvolumenstrom um das bis zu Dreifache ansteigen kann. Damit wären modale Verdünnungsgrade von $DF < 2$ denkbar. Dies setzt nach Abbildung 3-20 eine Beheizung der Leitungen auf 50 °C voraus. Die Ergebnisse stimmen mit jenen aus [13] überein.

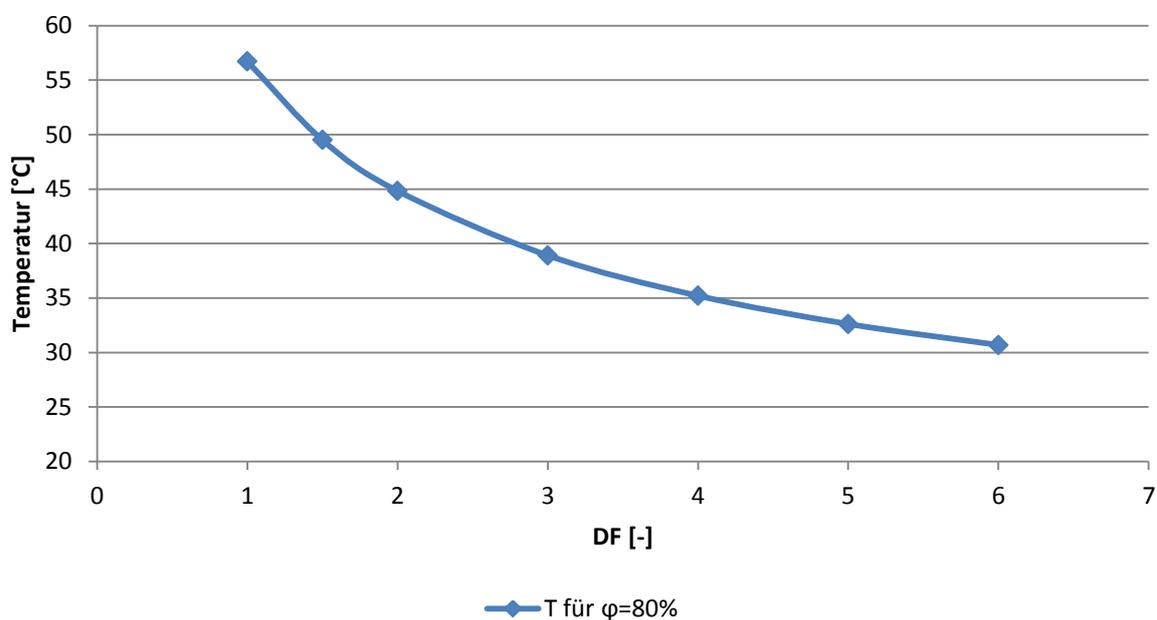


Abbildung 3-20: Benötigte Abgas-Temperatur für eine relative Feuchte der verdünnten Abgase von $\varphi=80\%$ bei $T_{\text{Luft}}=24\text{ °C}$, $p_{\text{Luft}}=980\text{ mbar}$ und $\varphi_{\text{Luft}}=50\%$

Alle abgasführenden Leitungen des Probenahme- und Messsystems der CVS-Anlage sollen auf einer Mindesttemperatur von 50 °C gehalten werden. Für die Beutel sowie für die Leitung von den Beuteln zu den Analysatoren reichen 30 °C aus.

3.7 Vergleichsmessung an der CVS-Anlage

Im Laufe der Jahre wurden etliche Zweiräder auf dem Rollenprüfstand der TU-Graz vermessen. Es konnten dabei immer wieder geringfügige Unterschiede bei den Emissionsmessdaten, die mit geschlossenen CVS-Anlagen gemessen wurden, und jenen die mit der offenen CVS-Anlage des Rollenprüfstand der TU Graz gemessen wurden, festgestellt werden. Die Unterschiede wurden dem geänderten CVS System zugeordnet. Dieses Phänomen konnte verstärkt bei Fahrzeugen mit Zweitaktmotoren und Vergasern beobachtet werden. Da bisher aber keine direkten Vergleichsmessungen zwischen beiden Anlagentypen durchgeführt wurden, stehen diesbezüglich keine Daten zur Verfügung. Um die Eignung einer zukünftigen CVS-Anlage für alle Fahrzeuge sicherzustellen und das zuvor beschriebene Phänomen zu klären, wurden Vergleichsmessungen zwischen offener und geschlossener CVS-Anlage am Zweiradrollenprüfstand der TU Graz durchgeführt.

3.7.1 Abgasgegendruckmessungen

Zu Beginn wurden die Druckschwankungen am Auspuffende, aufgrund des Anschlusses an eine geschlossene CVS-Anlage gegenüber einer offenen CVS-Anlage, untersucht und quantifiziert.

Die Verordnung EU 134/2014 macht diesbezüglich folgende Vorgaben:

„Verbindung zum Fahrzeugauspuff

Das Verbindungsrohr zwischen den Auspuffendrohren des Fahrzeugs und dem Verdünnungssystem muss möglichst kurz sein und den nachstehenden Vorschriften entsprechen:

a) Es muss kürzer als 3,6 m oder – wenn es wärmeisoliert ist – kürzer als 6,1 m sein. Sein Innendurchmesser darf höchstens 105 mm betragen;

b) es darf den statischen Druck an den Auspuffendrohren des Prüffahrzeugs um nicht mehr als

***$\pm 0,75$ kPa bei 50 km/h, oder $\pm 1,25$ kPa während der gesamten Prüfung gegenüber dem statischen Druck verändern,** der ohne Verbindungsrohr an den Auspuffendrohren gemessen wurde.*

***Der Druck muss im Auspuffendrohr oder in einem Verlängerungsrohr mit gleichem Durchmesser gemessen werden,** und zwar möglichst nah am Rohrende.*

Probenahmesysteme, mit denen diese Unterschiede des statischen Drucks auf $\pm 0,25$ kPa begrenzt werden können, können dann verwendet werden, wenn ein Hersteller gegenüber dem Technischen Dienst die Notwendigkeit der kleineren Toleranz schriftlich begründet;“

Die Abbildung 3-21 zeigt einen prinzipiellen Aufbau für eine geschlossene CVS-Anlage.

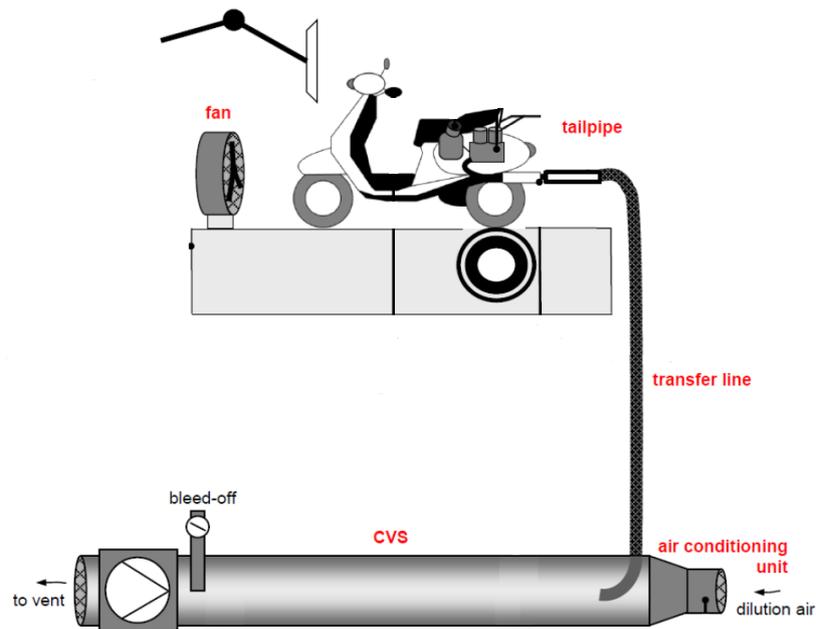


Abbildung 3-21: Schaubild einer geschlossenen CVS-Anlage [7]

Um möglichst nahe an den Betriebszuständen einer tatsächlich ausgeführten, geschlossenen Anlage zu sein, wurde der bereits aus Partikelmessungen vorhandene Verdünnungstunnel des Rollenprüfstandes in den Versuchsaufbau miteingebunden. Der Einfluss etwaiger Volumina wird so mitberücksichtigt. Abbildung 3-22 zeigt den Verdünnungstunnel des Zweiradrollenprüfstandes.



Abbildung 3-22: Vorhandener Verdünnungstunnel (DT)

Der Tunnel wurde, wie in Abbildung 3-23 zu sehen, an einer Seite mittels eines Ringwellenschlauchs an die CVS-Anlage angeschlossen. Die gegenüberliegende Seite wurde offen gelassen und stellt den Pfad für die Verdünnungsluft dar. Der Verdünnungstunnel wurde mittels Flanschverbindungen um ein Zwischenstück erweitert. In das Zwischenstück wurde ein 90° Bogen koaxial eingeschweißt und über eine Reduzierung (104/69) mit einem Anschlussstück für einen weiteren Ringwellenschlauch zum Fahrzeug versehen.



Abbildung 3-23: DT Umbau für geschlossene CVS

Die Auspuffanlage des Prüffahrzeuges wurde so adaptiert, dass eine Verlängerung mit gleichem Durchmesser an das Auspuffrohr angeschweißt und mit einer Druck-(1) und Temperaturmessstelle(2) versehen wurde. Zwischen Katalysator und Sekundärluftanschluss wurde zusätzlich noch eine Sonde(3) für die Rohabgasentnahme angebracht. Abbildung 3-24 zeigt die Auspuffadaptierung. Am Ende der Verlängerung wurde eine aufgebohrte 3“ 6-kant-Kappe(4) angeschweißt, um über ein Kamlok-Mutterteil eine dichte Verbindung an den Ringwellenschlauch herzustellen.

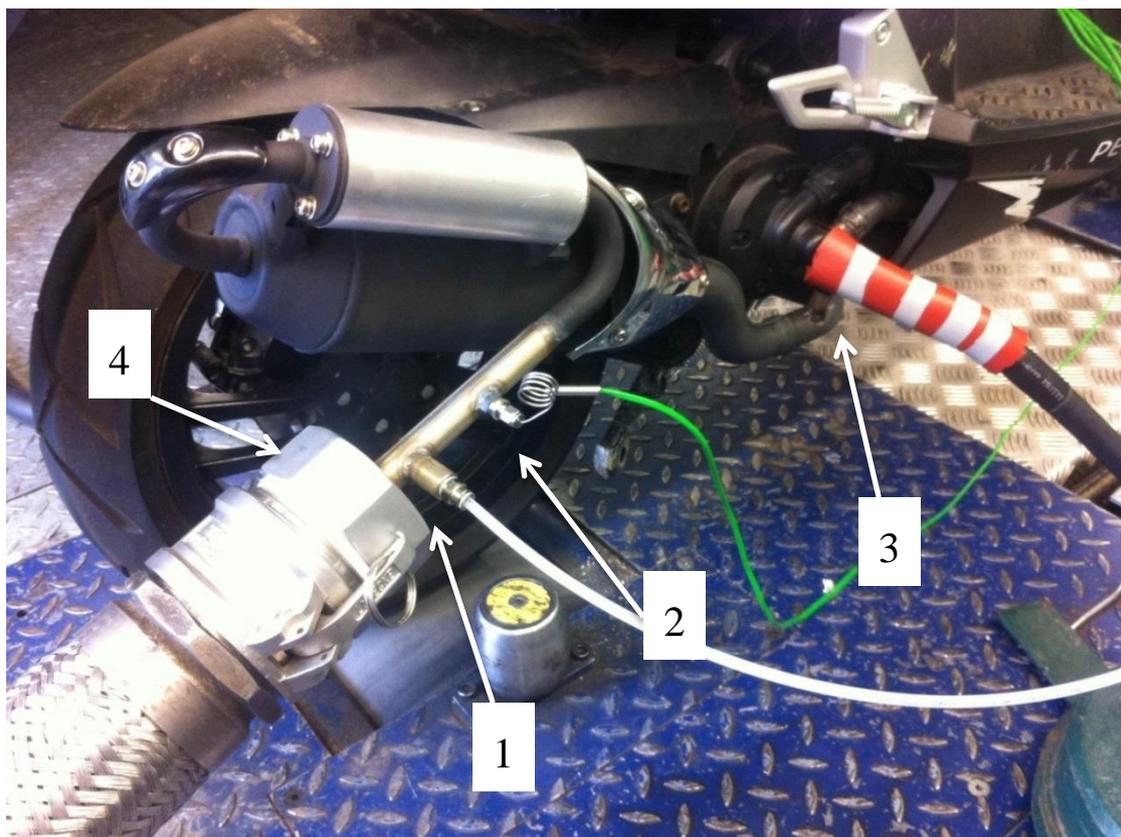


Abbildung 3-24: Auspuffadaptierung

In Tabelle 3-7 sind die Spezifikationen des Testfahrzeuges (Peugeot Speedfight 3) aufgelistet. Die Auswahl eines Testfahrzeugs mit Zweitaktmotor, Vergaser und Sekundärluftsystem wurde bewusst getroffen, da hier die größten Beeinflussungen durch den erzeugten Unterdruck erwartet werden. Beim Zweitaktmotor spielt die Gasdynamik eine bedeutende Rolle und kann vom Unterdruck des geschlossenen Systems verändert werden. Des Weiteren können voreingestellte Vergaser und Sekundärluftsysteme durch den zusätzlichen Unterdruck in ihrer Funktion beeinflusst werden. Das Testfahrzeug wird daher als kritisches Fahrzeug für die Nutzung einer geschlossenen CVS-Anlage angesehen. Im Umkehrschluss wird bei keiner merklichen Beeinflussung des Versuchsträgers durch die CVS-Anlage von einer wahrscheinlichen Eignung für alle weiteren Fahrzeuge ausgegangen.

Tabelle 3-7: Spezifikationen des Testfahrzeuges

Testfahrzeug	Peugeot Speedfight 3
Leistung	3,0 kW
Hubraum	49,9 ccm
Zylinder	1
Arbeitsspiel	2-Takt
Besonderheit	Vergaser Sekundärluftsystem

Abbildung 3-25 zeigt den fertigen Versuchsaufbau für die Emissionsmessung bei geschlossener CVS Anlage. Für die ersten Versuche zur Untersuchung der Druckschwankungen und des erzeugten Unterdrucks durch die geschlossene CVS wurde der Druck wie auch die Temperatur im Auspuffrohr, anders als bei den Emissionsmessungen in Abbildung 3-25, mithilfe eines Indiziermesssystems aufgezeichnet. Die Druckmessung wurde mit einem gekühlten, piezoresistiven Absolutdrucksensor durchgeführt mit einer Abtastrate von bis zu 500 Hz. Für die Abgastemperaturmessung wurde ein Thermocouple vom Typ K eingesetzt. Zur Überwachung der Temperatur des Drucksensors ist dieser zusätzlich mit einem Thermoelement Typ K versehen. Um den Drucksensor vor zu hohen Mediumstemperaturen schützen zu können, ist dieser über ein internes Ventil vom Medium getrennt, welches mit Hilfe von Druckluft geöffnet werden kann.



Abbildung 3-25: Versuchsaufbau für geschlossene CVS Messung

Die ersten Messungen galten dem Test des Versuchsaufbaus und der Messkette, so wie der Plausibilisierung der Messwerte. Das Fahrzeug wurde an die geschlossene CVS-Anlage angeschlossen, das CVS-Gebläse eingeschaltet, der Motor jedoch nicht gestartet. Der Auspuff ist über die Verbindungsleitung TT mit der Mischstelle verbunden. Durch den abgestellten Motor und das deaktivierte Sekundärluftsystem stellt sich jedoch keine Strömung ein. Der gemessene Druck im Auspuff, entspricht somit dem Druck an der Mischstelle im Verdünnungstunnel. Stück für Stück wurden die Strömungskanalabschnitte, wie in Abbildung 3-22 zu sehen, für die Verdünnungsluft abgebaut (Stripdown-Versuch) und zum Schluss eine Blende vor dem offenen Verdünnungstunnel angebracht. Der Druck wurde dabei fortlaufend mitaufgezeichnet. Der Verlauf kann Abbildung 3-26 entnommen werden. Die dabei aufgetretenen Veränderungen im Druckniveau konnten rechnerisch als Strömungsverluste nachvollzogen werden. Die Berechnung der Strömungsverluste kann dem Anhang 4 entnommen werden.

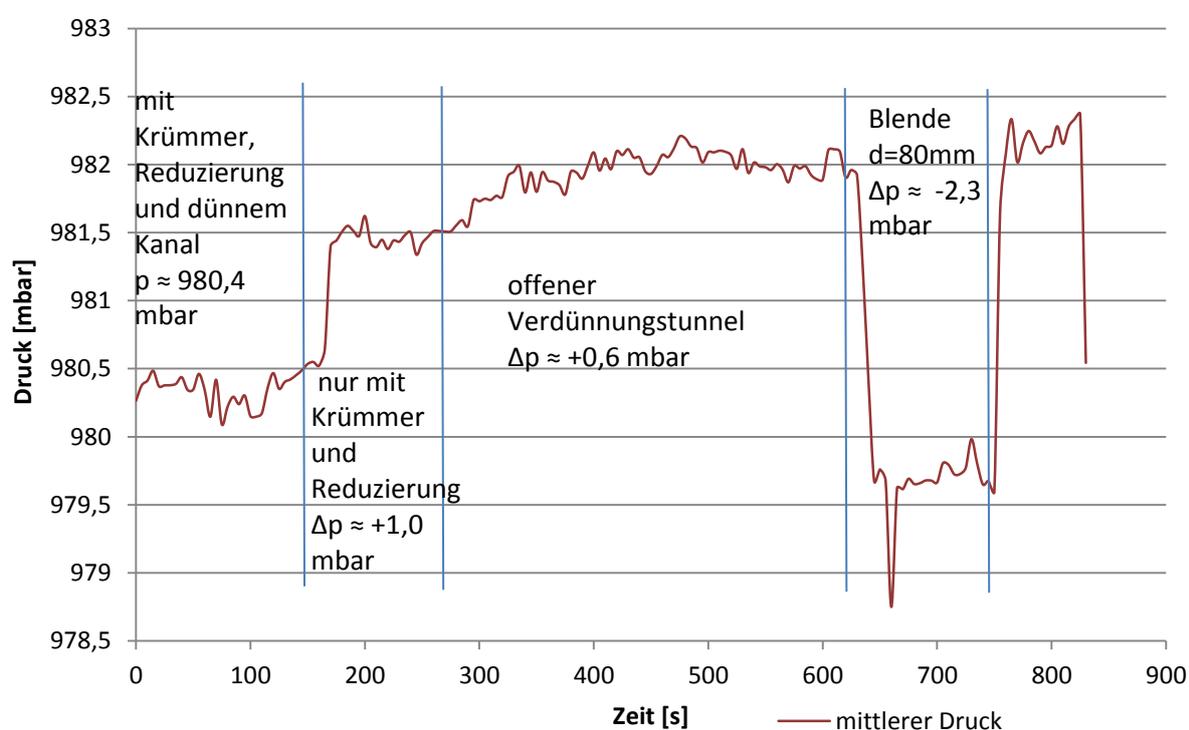


Abbildung 3-26: Mittlerer Druckverlauf beim Stripdown-Versuch
(CVS_Messung_2017_07_06_0001)

Die am Eintritt des Verdünnungstunnels angebrachte Blende wurde so dimensioniert, dass sich ein Druckverlust von ca. 2,5 mbar einstellt, was dem maximal zulässigen Druckverlust über den Verdünnungsluft-Filtern entspricht.

Der mittlere Druckverlauf des Stripdown-Versuchs, inklusive der Maxima und Minima der auftretenden Druckschwankungen um den Mittelwert, ist in Abbildung 3-27 dargestellt. Eine Frequenzanalyse des Drucksignals hat ergeben, dass das Rootgebläse einen großen Einfluss auf die Größe der Druckschwankungen hat. Das Roots-Gebläse dreht bei einem Volumenstrom von 4000 l_N/min mit 490 U/min, das beutet eine Frequenz von 8,166 Hz. Bei jeder Umdrehung finden vier Volumenausschübe statt, was zu einer Pulsationsfrequenz von 32,66 Hz führt. Daneben treten auch Modi mit halber und doppelter Frequenz auf. Wie in Abbildung 3-28 ersichtlich, haben diese drei Frequenzen auch die größten Amplituden und tragen damit maßgeblich zu den Druckschwankungen um den Mittelwert bei. Die Frequenzanalysen für verschiedene Abschnitte des Stripdown-Versuchs sind im Anhang 5 beigefügt.

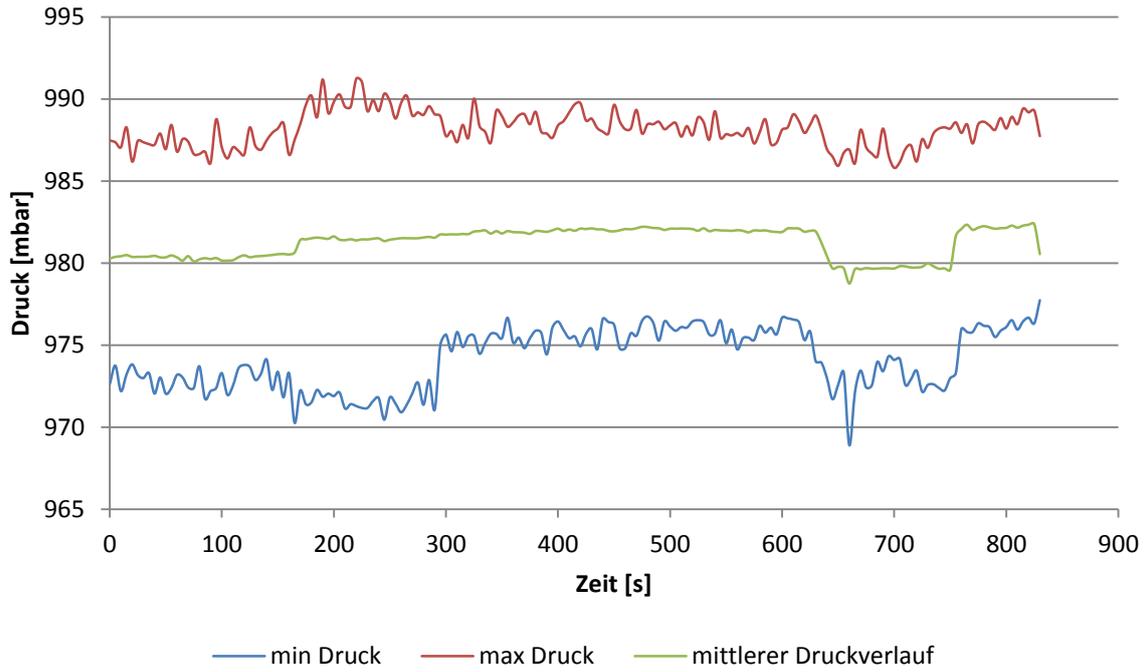


Abbildung 3-27: Realer Druckverlauf beim Stripdown-Versuch
(CVS_Messung_2017_07_06_0001)

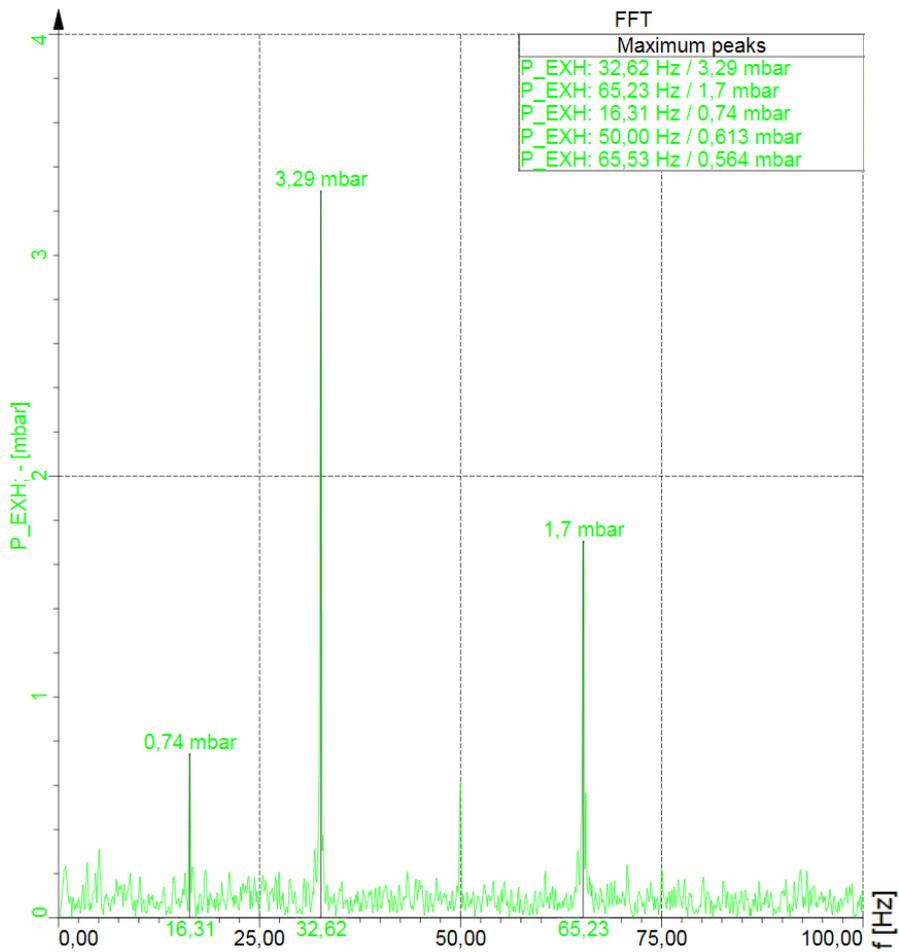


Abbildung 3-28: Frequenzanalyse des Drucksignals zum Zeitpunkt 207 s
(CVS_Messung_2017_07_06_0001)

Bei der nachfolgenden Messung zur Bestimmung des Druckniveaus wurde die geschlossene Anordnung beibehalten und das CVS-Gebläse ausgeschaltet. Es war nur die Raumlüftung und die Abgasabsaugung in Betrieb. In der Frequenzanalyse des Drucksignals, siehe Abbildung 3-29, traten die zuvor erwähnten Frequenzen nicht mehr auf.

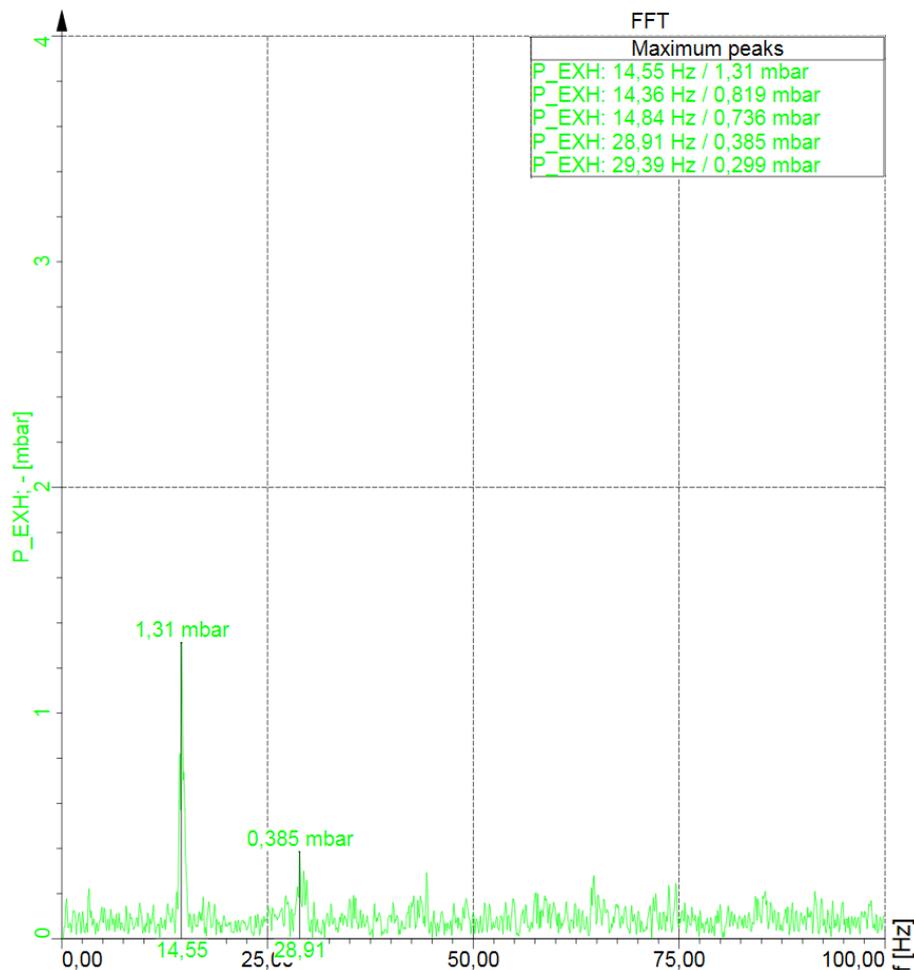


Abbildung 3-29: Frequenzanalyse des Drucksignals zur Niveaubestimmung (CVS_Messung_2017_07_06_0002)

Vergleicht man die Ergebnisse mit dem Druckverlauf einer offenen CVS-Anlage in Abbildung 3-30, so kann man auch hier, bei einem stehenden Motor, die Pulsationen des Rootsgebläses erkennen, wenn auch deutlich schwächer. Um diese überhaupt sichtbar zu machen, musste ein Tiefpassfilter angewendet werden.

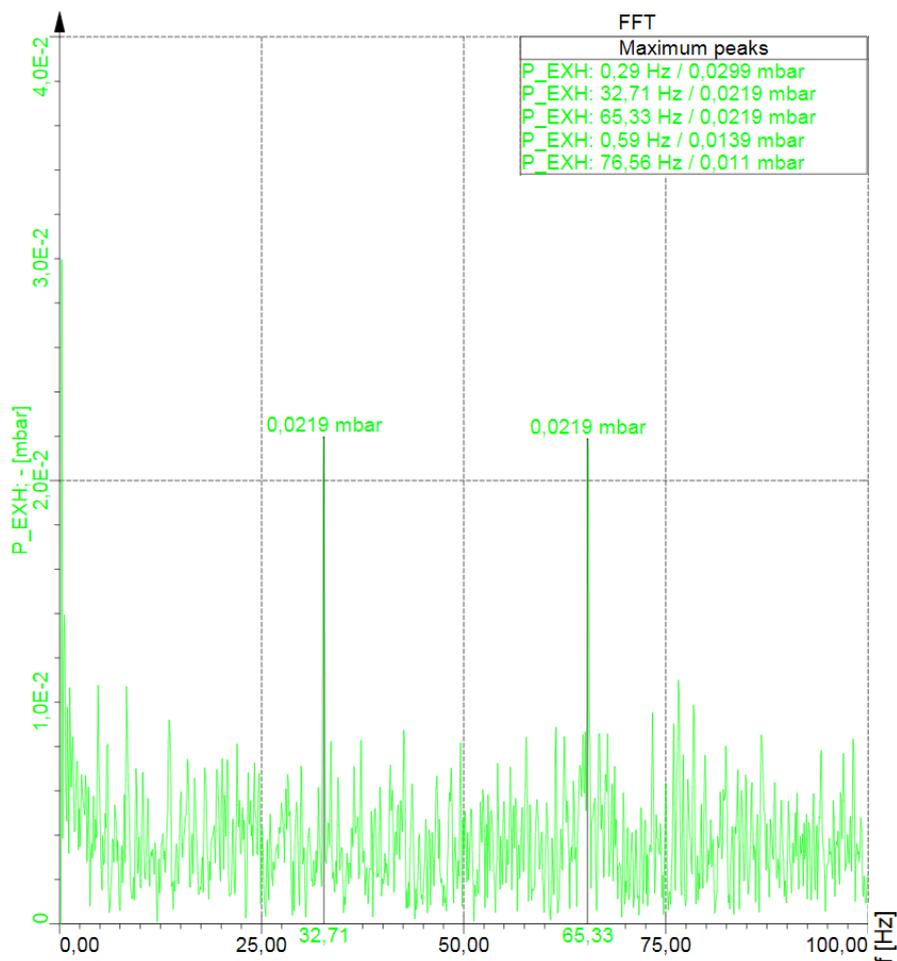


Abbildung 3-30: Frequenzanalyse des Drucksignals bei offener CVS Anlage und nicht gestartetem Motor (CVS_Messung_2017_06_27_0001)

In weiterer Folge wurde ein kompletter ECE R47 Fahrzyklus sowohl für die geschlossene, als auch für die offene CVS-Anlage absolviert (immer noch ohne Sekundärluftsystem). Im Vordergrund stand die Untersuchung des Druckunterschiedes zwischen offenem und geschlossenem System über einen Zyklus. Um beide Druckkurven miteinander vergleichen zu können, wurden deren Verläufe über die mitaufgezeichneten Temperaturverläufe eingepasst. Darüber hinaus musste eine der Druckkurven aufgrund von Luftdruckunterschieden und leichten Drifterscheinungen korrigiert werden, damit der Startdruck zu Beginn beider Verläufe gleich ist. Dargestellt sind die Verläufe in Abbildung 3-31. Die Druckdifferenz beträgt 2-3 mbar, was im Grunde dem Druckverlust über der Blende entspricht. Dieser Versuch wurde später für den ersten Teil des ECE R47 Zyklus wiederholt. Dabei wurde ebenfalls die Reihenfolge vertauscht und zuerst offen und dann geschlossen gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-32 zusammengefasst. Auch hier beträgt die Druckdifferenz 2,5-3 mbar über den gesamten Zyklusteil, was dem Druckverlust über der Blende entspricht.

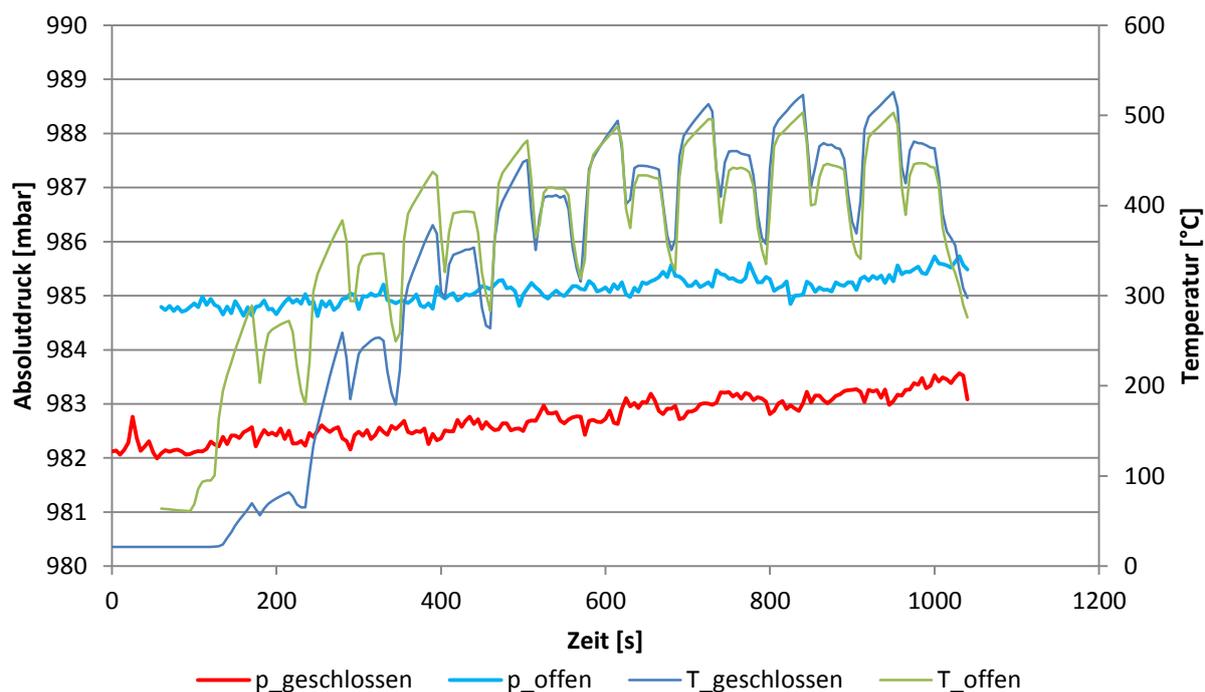


Abbildung 3-31: Mittlere Druckdifferenz für ECE R47 Zyklus
(CVS_Messung_2017_07_06_0003 und CVS_Messung_2017_07_06_0006)

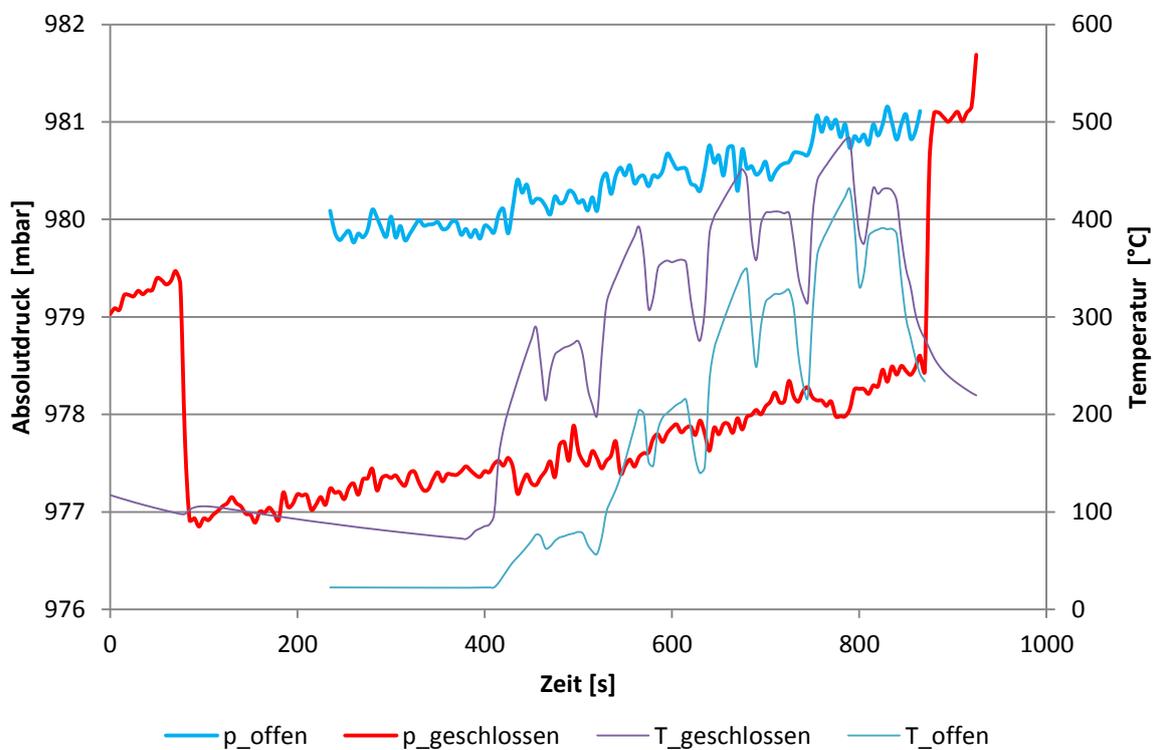


Abbildung 3-32: Mittlere Druckdifferenz für ECE R47 Zyklus Phase 1
(CVS_Messung_2017_07_07_0001 und CVS_Messung_2017_07_07_0003)

Abbildung 3-33 zeigt die auftretenden mittleren Druckschwankungsamplituden für offene und geschlossene Messungen. Wie man sehen kann sind die Schwankungen um den jeweiligen Mittelwert für beide Varianten etwa gleich groß. Die Maximal- und Minimalwerte der geschlossenen Anlage sind gegenüber den Werten der offenen Anlage nach unten verschoben. Das bedeutet wiederum, dass sich die Druckschwankungen des geschlossenen Systems für eine längere Zeitdauer unterhalb des Umgebungsdrucks befinden.

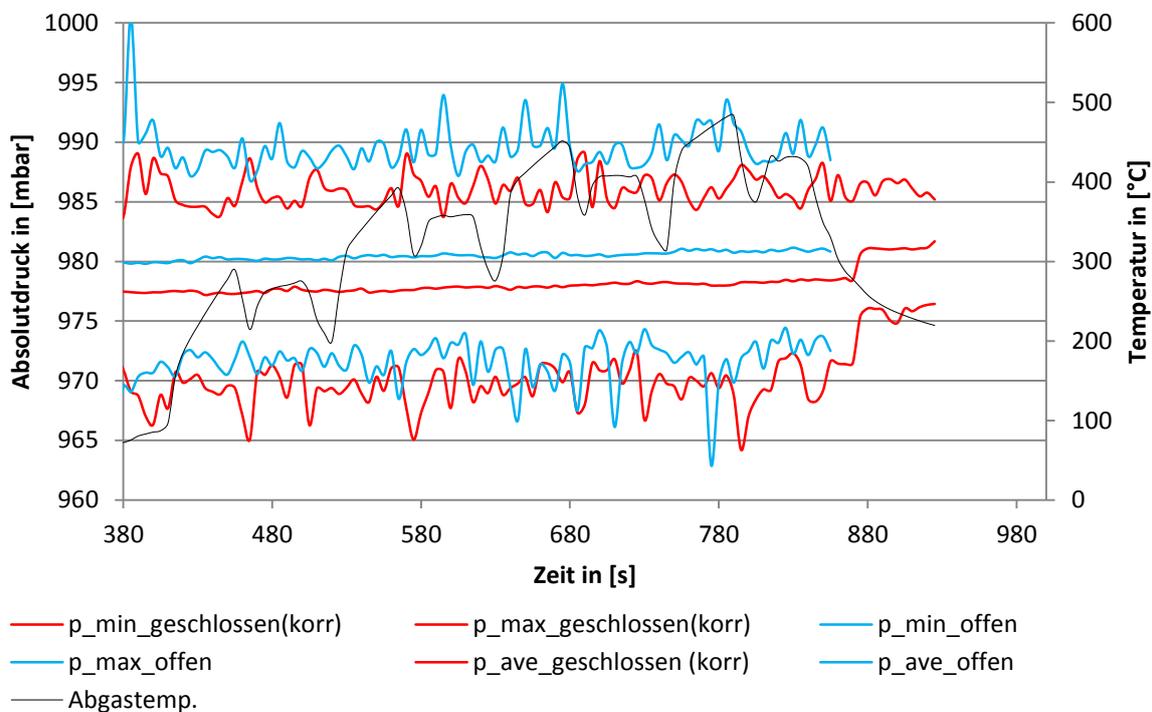


Abbildung 3-33: Vergleich der Schwankungsamplituden zwischen offen und geschlossen für den 1. Teil des ECE R47 Testzyklus (CVS_Messung_2017_07_07_0001 und CVS_Messung_2017_07_07_0003)

Abbildung 3-34 zeigt die bei den Emissionsmessungen mit einem Absolutdrucksensor und angeschlossenem Sekundärluftsystem aufgezeichneten Druckverläufe.

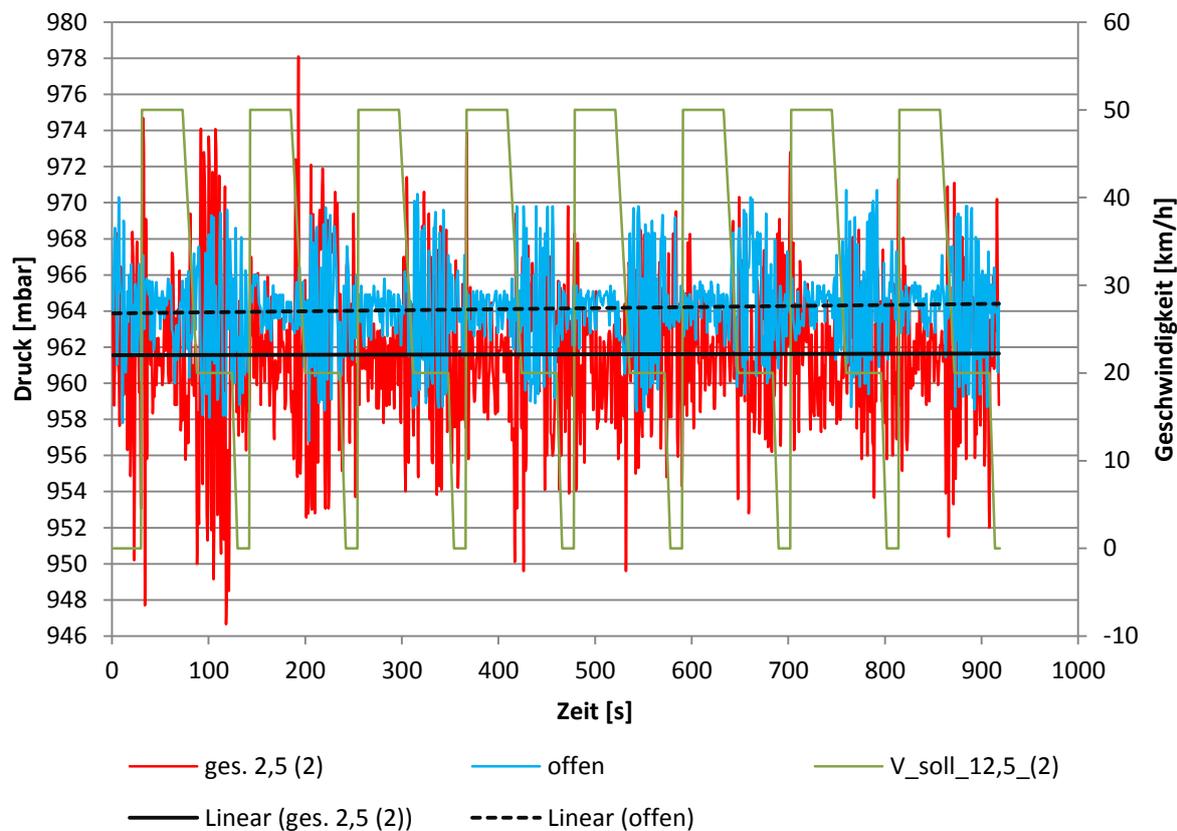


Abbildung 3-34: Druckverlauf aufgezeichnet mit Absolutdrucksensor

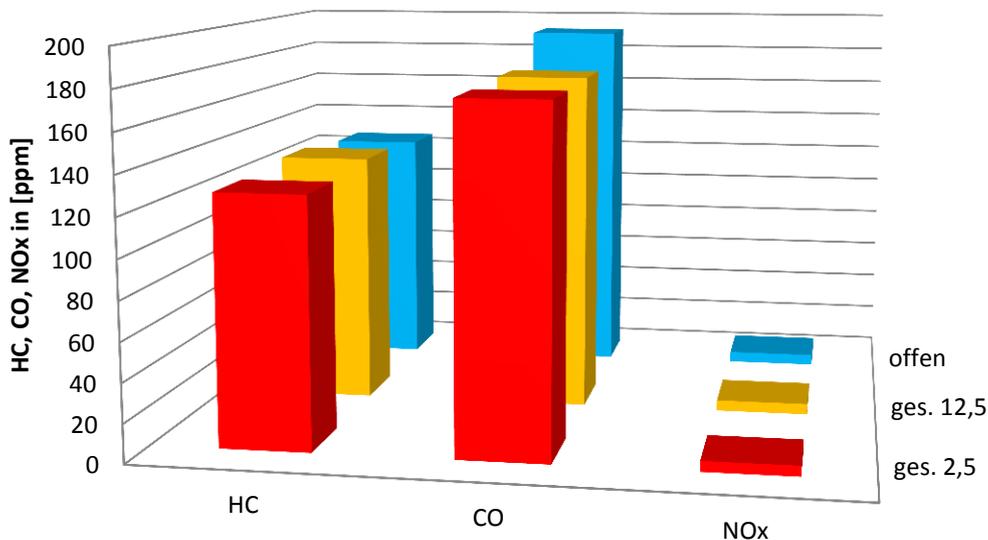
Wie man in den Abbildung 3-33 und Abbildung 3-34 sehen kann, bleiben bei einem erzeugten Unterdruck von 2,5mbar die Druckschwankungen innerhalb eines Rahmens von 12,5mbar um den Druckverlauf der offenen Anlage.

3.7.2 Emissionsmessungen

Im Anschluss an die Druckuntersuchungen wurden die Auswirkungen des unterschiedlichen Druckniveaus und der Druckverläufe auf den Motorbetrieb sowie das damit verbundene Emissionsverhalten des Rollers untersucht. Zusätzlich zu den Modal- und Beutelemissionswerten der AVL AMA Analyse wurde, wie bereits in Abbildung 3-24 erwähnt, eine Rohabgassonde zwischen Sekundärluftanschluss und Katalysator installiert. Das Rohabgas wurde über eine beheizte Leitung dem AVL DITEST GAS 1000 Analysegerät zugeführt. Dieses misst über eine IR-Messbank die relativen Volumenanteile der Gase CO, CO₂, HC, O₂ und NO. Mithilfe der Brettschneider Formel und der Messgaskonzentrationen wird zusätzlich das globale Lambda berechnet. Für den besseren Vergleich wurden alle Versuche als Kaltstart ausgeführt. Es wurde jeweils dreimal der ECE R47 Zyklus für das offene System, das geschlossene System bei ca. 2,5 mbar mittlerem Unterdruck und das geschlossene System mit reduzierter Blendenöffnung und einem mittleren Unterdruck von ca. 12,5 mbar gefahren.

3.7.2.1 Einfluss auf Emissionen

Aufgrund des unterschiedlichen Kaltstartverhaltens des Zweitaktmotors, war eine Aussage der Beutelemissionen des ersten Zyklusteils hinsichtlich des Einflusses der CVS-Variante auf das Emissionsverhalten nicht möglich. Deshalb wird in weiterer Folge verstärkt der zweite Zyklusabschnitt untersucht. Die gemittelten Beutelemissionen des 2. Zyklusteils der jeweils gefahrenen drei Zyklen jeder Variante sind Abbildung 3-35 und Abbildung 3-36 zu entnehmen.



	HC	CO	NOx
■ ges. 2,5	127,93	175,27	5,40
■ ges. 12,5	130,60	175,77	5,57
■ offen	126,33	192,10	5,70

Abbildung 3-35: Gemittelte Beutelemissionen des 2. Zyklusteils

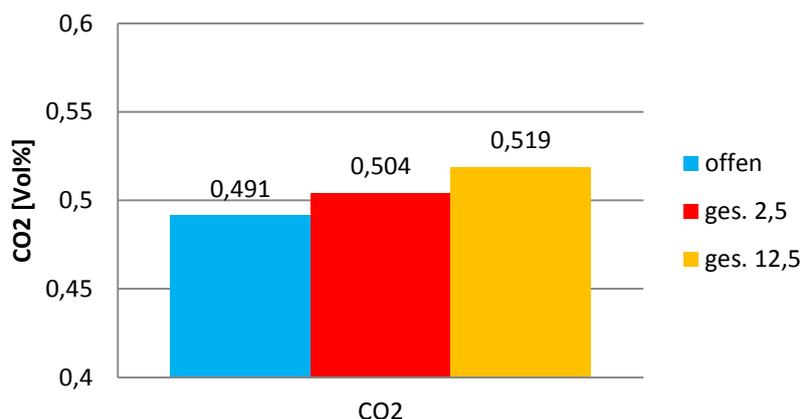


Abbildung 3-36: Gemittelte CO2 Beutel-Emissionen des 2.Zyklusteils

Nimmt man die Emissionen des offenen Systems als Referenzwert, so zeigt die Tabelle 3-8 die prozentuelle Veränderung der Emissionen der geschlossenen Systeme. HC und CO₂ haben die gleiche Tendenz: mit steigendem Unterdruck steigen auch die Emissionen. Die Entwicklung bei den NO_x Emissionen hat keine Tendenz und ist aufgrund ihrer sehr niedrigen Konzentration von nur rund 5,5 ppm, was weniger als 10% des RFS (range full scale) des niedrigsten Messbereichs entspricht, mit der größten Unsicherheit behaftet. Die Abnahme der CO-Emissionen ist für beide geschlossenen Ausführungen in etwa gleich.

Tabelle 3-8: Veränderung der Komponenten Konzentration in den Beuteln, bezogen auf die Konzentration im offenen System

	HC	CO	NO _x	CO ₂
geschlossen 2,5	+1,29 %	-8,76%	-5,26%	+2,65%
geschlossen 12,5	+3,40%	-8,50%	-2,33%	+5,70%

Um den Unterschieden genauer auf den Grund zu gehen und vorhandene Beeinflussungen der CVS Varianten feststellen zu können, wurden in weiterer Folge die modalen sowie die Rohemissionen untersucht. Abbildung 3-37 zeigt den Verlauf der HC Emissionen über den ECE R47 Zyklus. Um die Streuung zu berücksichtigen, wurde jeweils der mittlere Verlauf aus den drei gefahrenen Zyklen gebildet. Dies ist durch ein in Klammern gesetztes, nachgestelltes (m) gekennzeichnet. Die Farbgebung wurde in allen nachfolgenden Diagrammen konsequent beibehalten. Man erkennt deutlich die Unregelmäßigkeiten in der Startphase des ersten Zyklus, sowie den HC Overflow am Analysator durch, den anschließenden ausgegebenen Nullwert. Für eine bessere Übersicht und Vergleichbarkeit wird in weiterer Folge nur der zeitliche Ausschnitt zwischen Sekunde 550 und 850, also Zyklus 6 und 7 betrachtet.

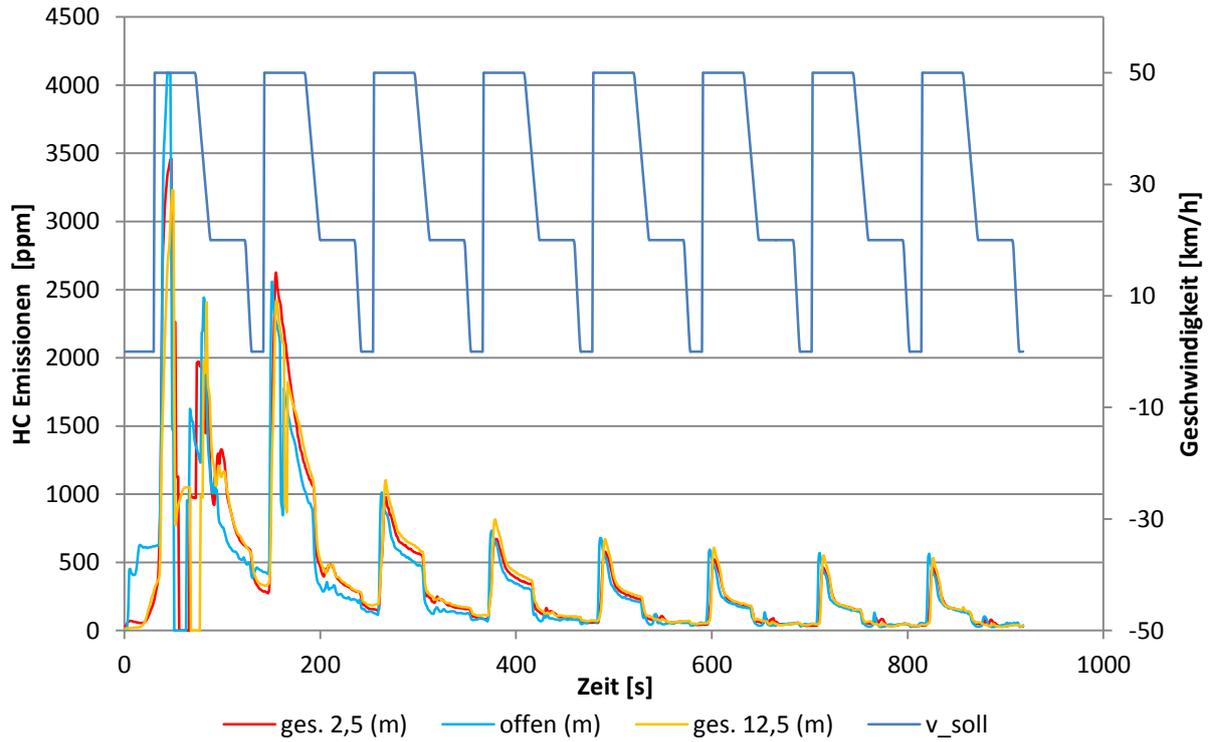


Abbildung 3-37: Gemittelte modale HC-Emissionen

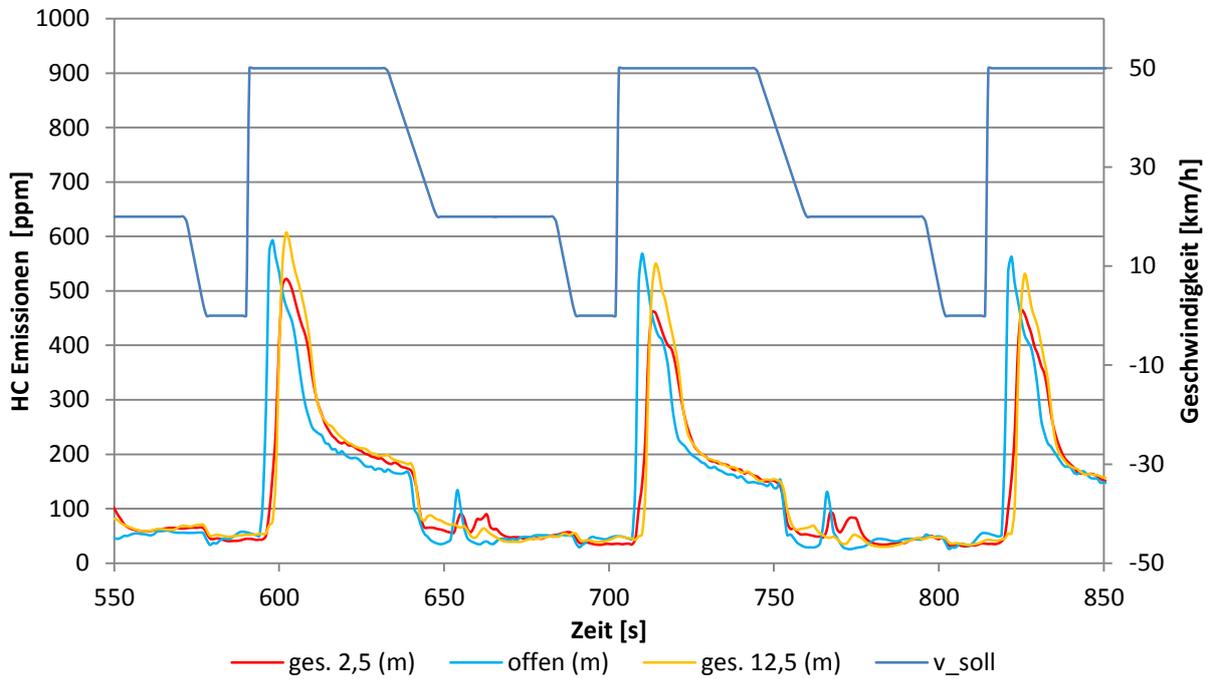


Abbildung 3-38: Gemittelte modale HC-Emissionen (Zyklus 6 und 7)

Wie schon die HC Beutel-Emissionen, sind auch die in Abbildung 3-38 ersichtlichen modalen HC-Verläufe der drei CVS Varianten, bis auf die geänderte Totzeitverschiebung, nahezu gleich. Unterschiede gibt es, neben dem geringeren Spitzenwert der roten Linie, hauptsächlich zu Beginn des 20 km/h Abschnitts. Das Einschwingen auf die 20 km/h ist jedoch stark fahrerabhängig und

kann daher von Fahrt zu Fahrt mehr oder weniger stark ausfallen. Womit die Emissionsunterschiede für HC zum Teil auch auf den Fahrer zurückgeführt werden können. Gleiches ist auch für die NO_x Emissionen in Abbildung 3-39 zu beobachten. Jedoch ist dieselbe Tendenz wie in den Beutelkonzentrationen, hier auch bei konstanter Fahrt mit 45 km/h zu beobachten. Der Fahrereinfluss ist wegen der voll geöffneten Drosselklappe jedoch nicht gegeben.

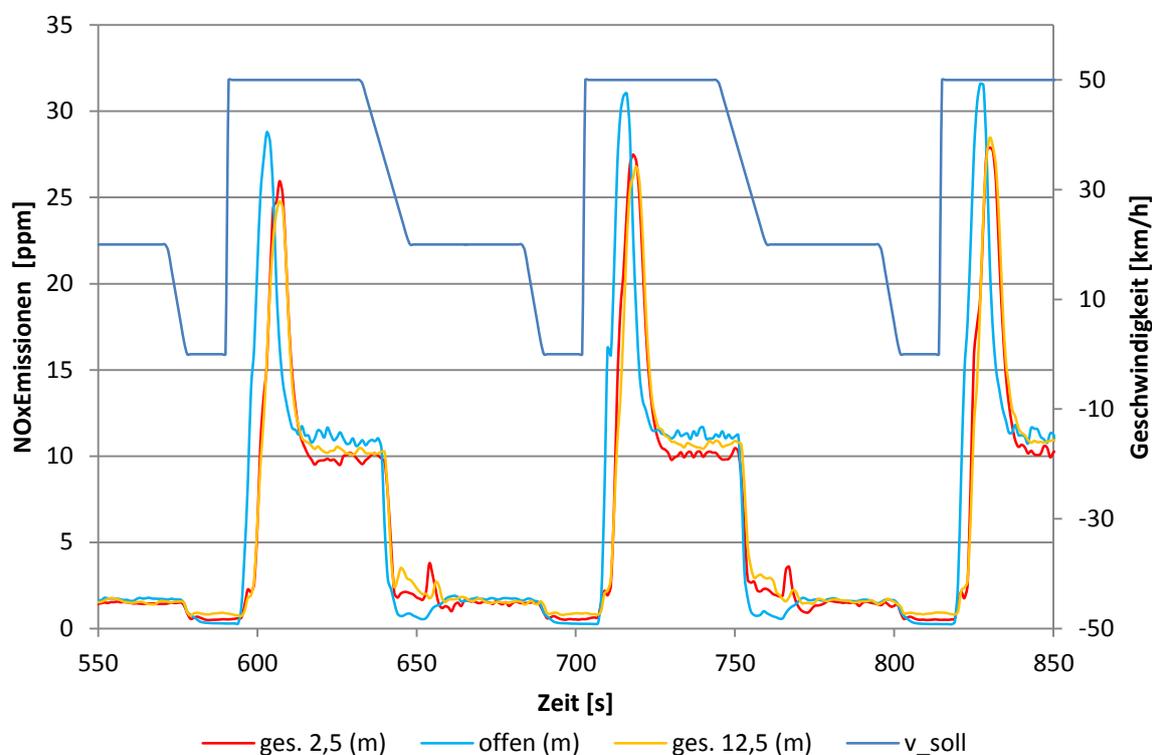


Abbildung 3-39: Gemittelte modale NO_x Emissionen (Zyklus 6 und 7)

Deutliche Unterschiede zwischen offen und geschlossen waren im modalen Verlauf der CO Emissionen erkennbar. Hier war durchgehend in allen Leerlaufphasen des Zyklus die CO Emission bei offener CVS Anlage deutlich über jenen der geschlossenen Anlage. Gleiches war auch für den CO-Peak zu Beginn des 20 km/h Abschnitts zu beobachten, wie Abbildung 3-40 zeigt. Bei konstanter Fahrt mit 45 km/h bzw. bei voll geöffnete Drosselklappe, sowie bei eingeschwungener Fahrt mit 20 km/h sind CO Emissionen annähernd gleich.

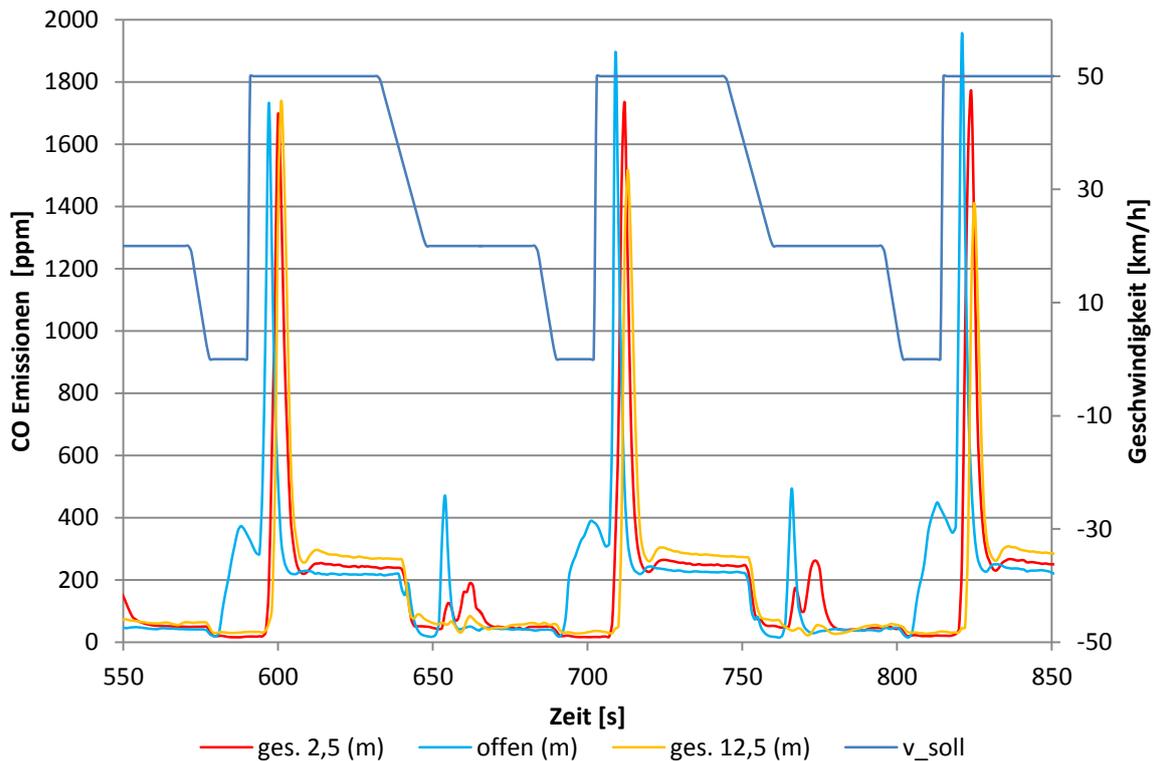


Abbildung 3-40: Gemittelte modale CO Emissionen (Zyklus 6 und 7)

Betrachtet man zugleich den modalen Verlauf von CO-Emissionen aus Messungen ohne Sekundärluftsystem in Abbildung 3-41, zeigt sich neben den höheren Emissionen während der Beschleunigung, auch in allen gedrosselten Betriebspunkten ein deutlich höheres Emissionsniveau. Das zeigt in welchen Bereichen das Sekundärluftsystem zu funktionieren scheint und in welchen nicht. Auffallend ist, dass die Emissionen für das offene System ohne SL (grüne Kurve) gleich wie in Abbildung 3-40, im Leerlauf über jenem des geschlossenen Systems ohne SL (schwarze Kurve) liegt.

Vergleicht man Abbildung 3-40 mit den CO-Rohemissionen in Abbildung 3-42, sieht man, dass sich der Rohemissionsverlauf ähnlich verhält. Der erzeugte Unterdruck in der geschlossenen CVS-Anlage scheint die konstanten Fahrten nicht merklich zu beeinflussen. Lediglich beim Drosseln von 45 auf 20 km/h und in Leerlaufphasen zeigt sich ein durchgängig unterschiedliches Emissionsniveau der 3 Anlagenvarianten. Dabei scheinen die CO Rohemissionen im Leerlauf für die offene CVS-Anlage am höchsten zu sein und mit steigendem Unterdruck der CVS-Anlage abzunehmen. Dies beruht aber mit großer Wahrscheinlichkeit auf unterschiedlichen Verdünnungsgraden des Rohabgases mit Sekundärluft, wie im nächsten Abschnitt erläutert.

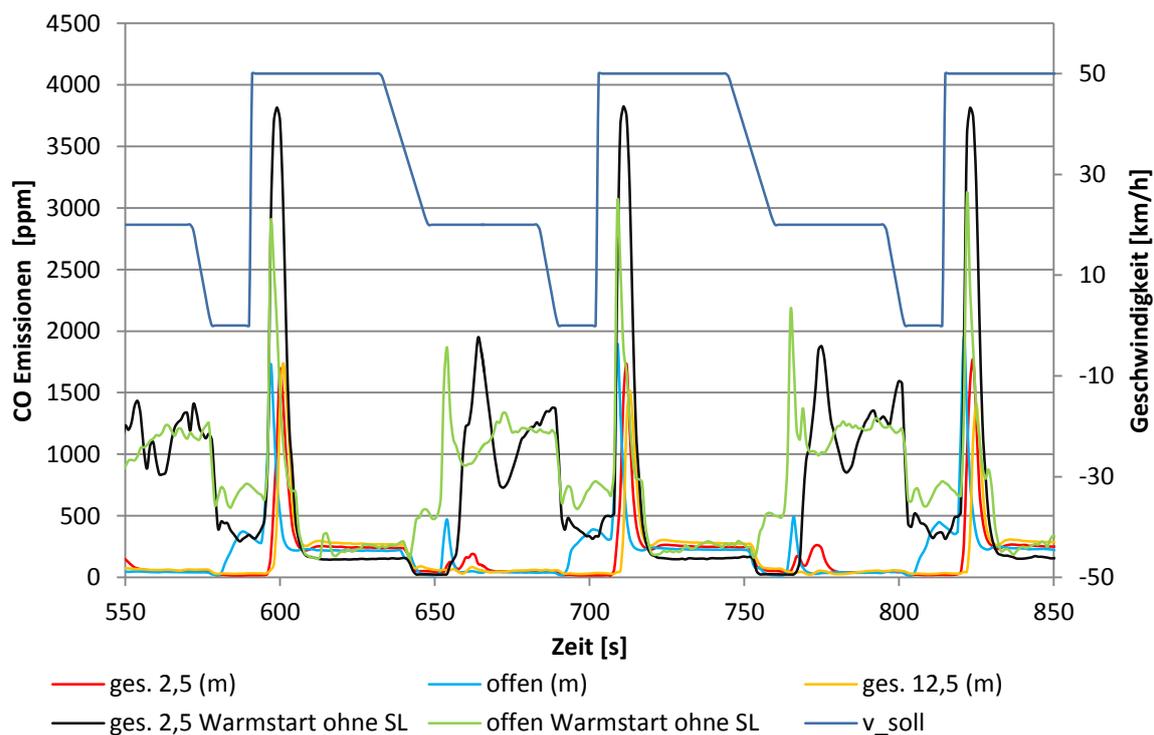


Abbildung 3-41: Modale AMA CO-Emissionen mit und ohne Sekundärluftsystem

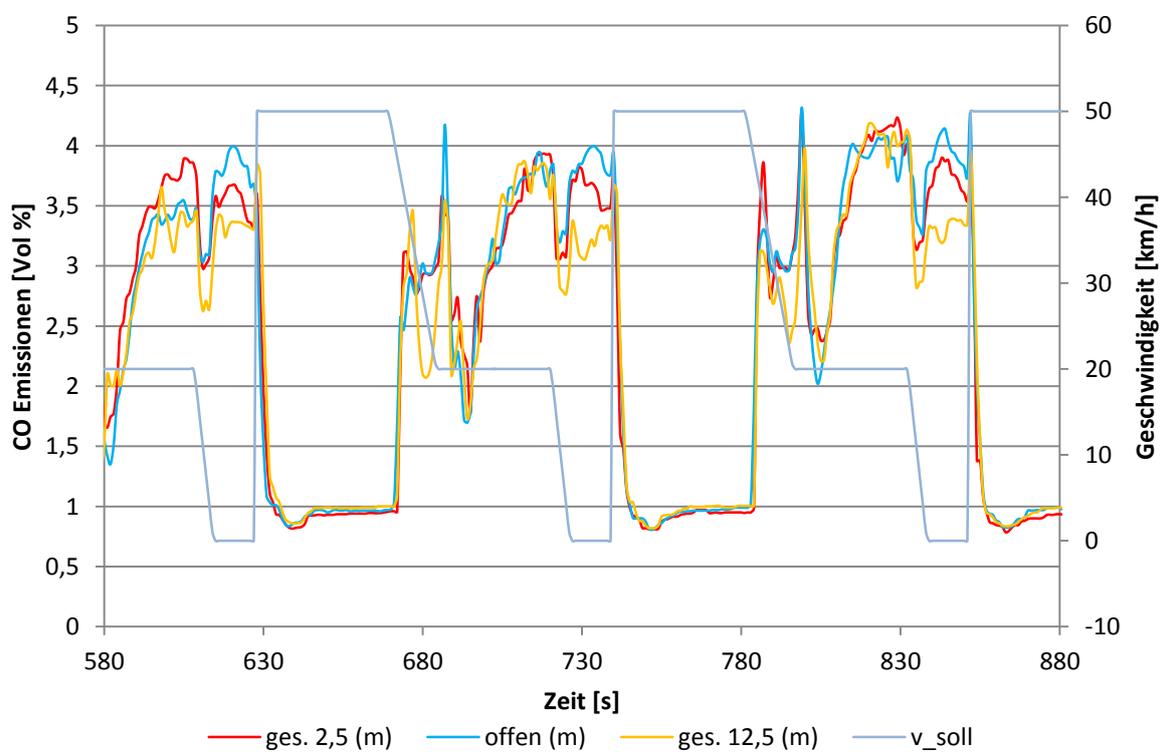


Abbildung 3-42: Gemittelte CO-Rohemissionen (Zyklus 6 und 7)

3.7.2.2 Beeinflussung des Sekundärluftsystems

Der in Abbildung 3-43 dargestellte Lambdaverlauf entspricht einem globalen Lambdawert, der aufgrund der Position der Rohabgassonde auch die Sekundärluft miteinschließt. Für die schwarze Kurve wurde das Sekundärluftsystem deaktiviert. Die schwarze Kurve repräsentiert somit das tatsächliche, globale Lambda über den Brennraum. Wie bereits erwähnt, wurde der Lambdawert nicht direkt gemessen, sondern aus den DITEST Konzentrationen berechnet. Die dabei zugrundeliegende NDIR/IRD Messmethode ist, aufgrund der niedrigen Absorption von Kohlenstoffaromaten mit Doppelbindungen nach [25] nicht im Stande alle Kohlenstoffe aus dem HC-Mix des Abgases zu detektieren. Der Lambdawert soll aus diesem Grund hier nicht quantitativ, sondern qualitativ herangezogen werden.

Bei voll geöffneter Drosselklappe und einem ohnehin mageren Betrieb ist das Sekundärluftventil quasi ohne Funktion. Wie Abbildung 3-43 zeigt, haben alle drei Varianten sowie eine zusätzliche Messung ohne SL (schwarze Linie), denselben Lambdawert. Wegen der hohen Drehzahl und der voll geöffneten Drosselklappe steigt der Abgasstrom und verursacht einen Abgasgedruck der über Umgebungsniveau liegt. Dadurch ist das Sekundärluftsystem außer Funktion. In den übrigen gedrosselten Betriebspunkten ist jedoch eine deutliche Steigerung des Luftgehalts gegenüber der schwarzen Linie erkennbar. In Schubphasen und im Leerlauf steigen der Lambdawert und damit die Sekundärluftmenge mit steigendem Unterdruck. Dies bestärkt die Vermutung, dass der Unterdruck der geschlossenen Anlage, in gedrosselten Phasen, mehr Luft über das Sekundärluftventil ansaugt. Dies führt wiederum durch stärkere Verdünnung der Rohabgase zu der zuvor erwähnten und in Abbildung 3-42 sichtbaren, vermeintlich niedrigeren CO Konzentration im Leerlauf der geschlossenen Anlagen. Gleiches lässt sich auch für die HC Rohemissionen in Abbildung 3-44 beobachten. Für die O₂ Konzentration in Abbildung 3-45 verhält es sich folglich genau andersherum.

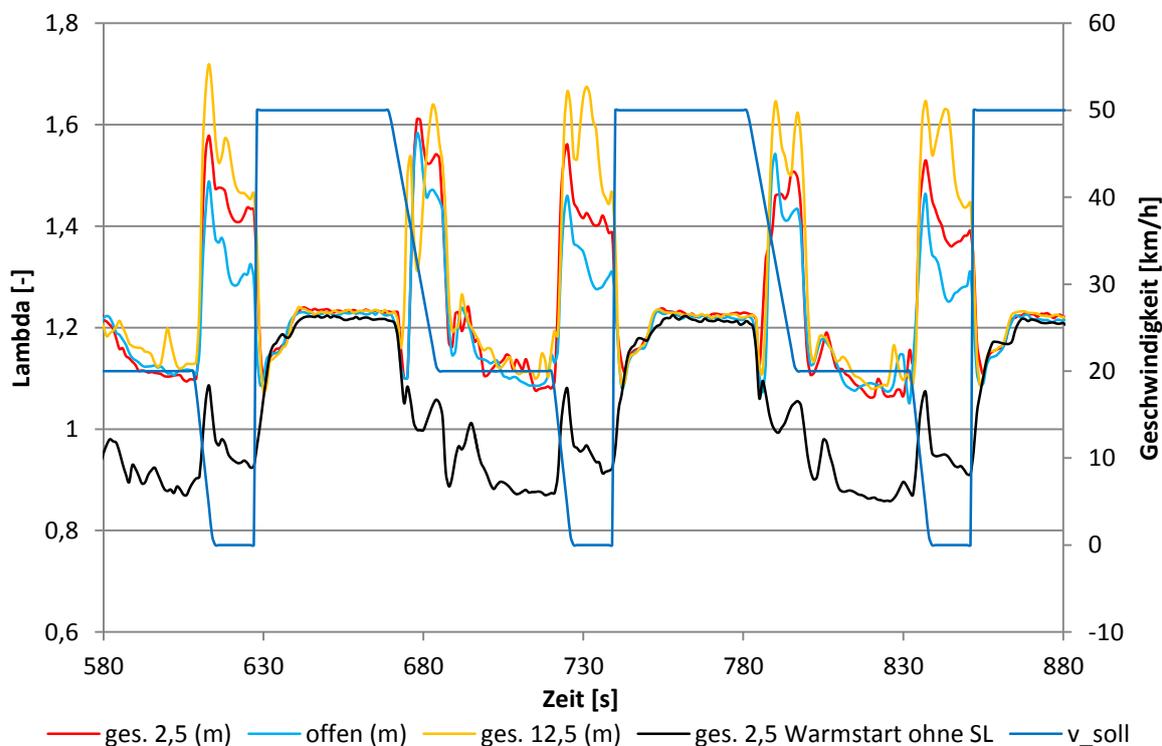


Abbildung 3-43: Globaler Lambda(Brettschneider)-Verlauf vor Kat (Zyklus 6 und 7)

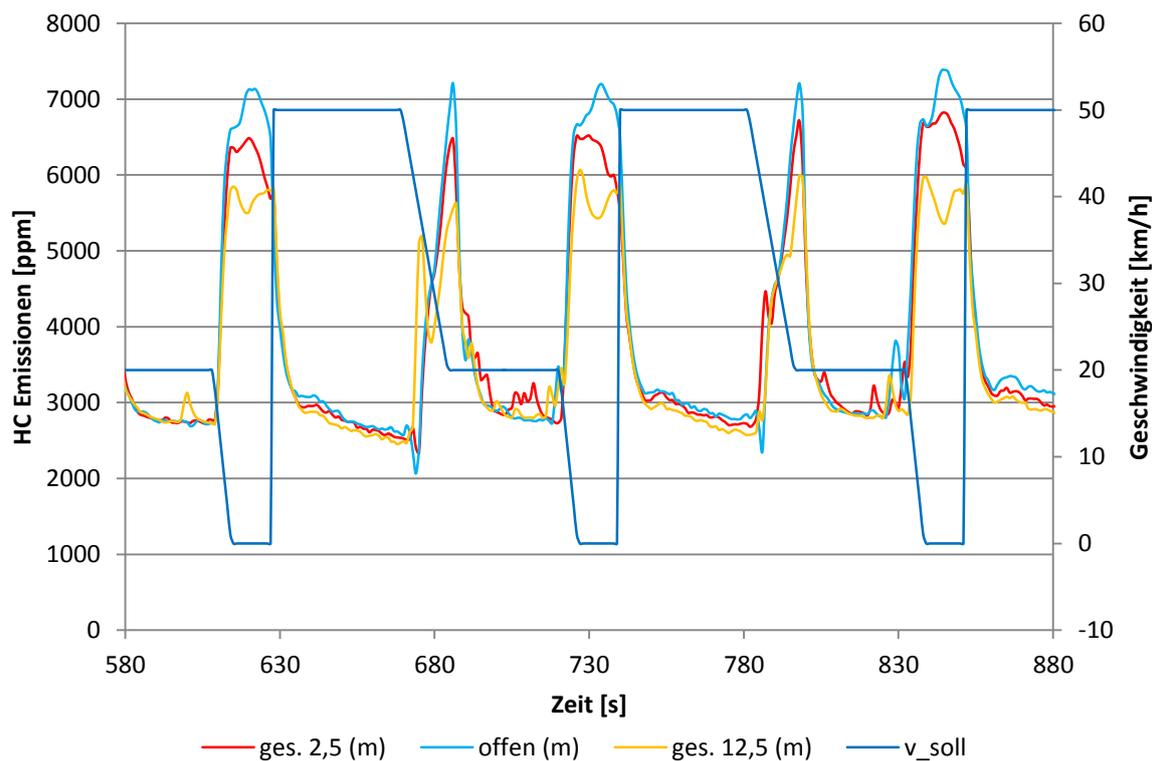


Abbildung 3-44: Gemittelte HC-Rohemissionen (Zyklus 6 und 7)

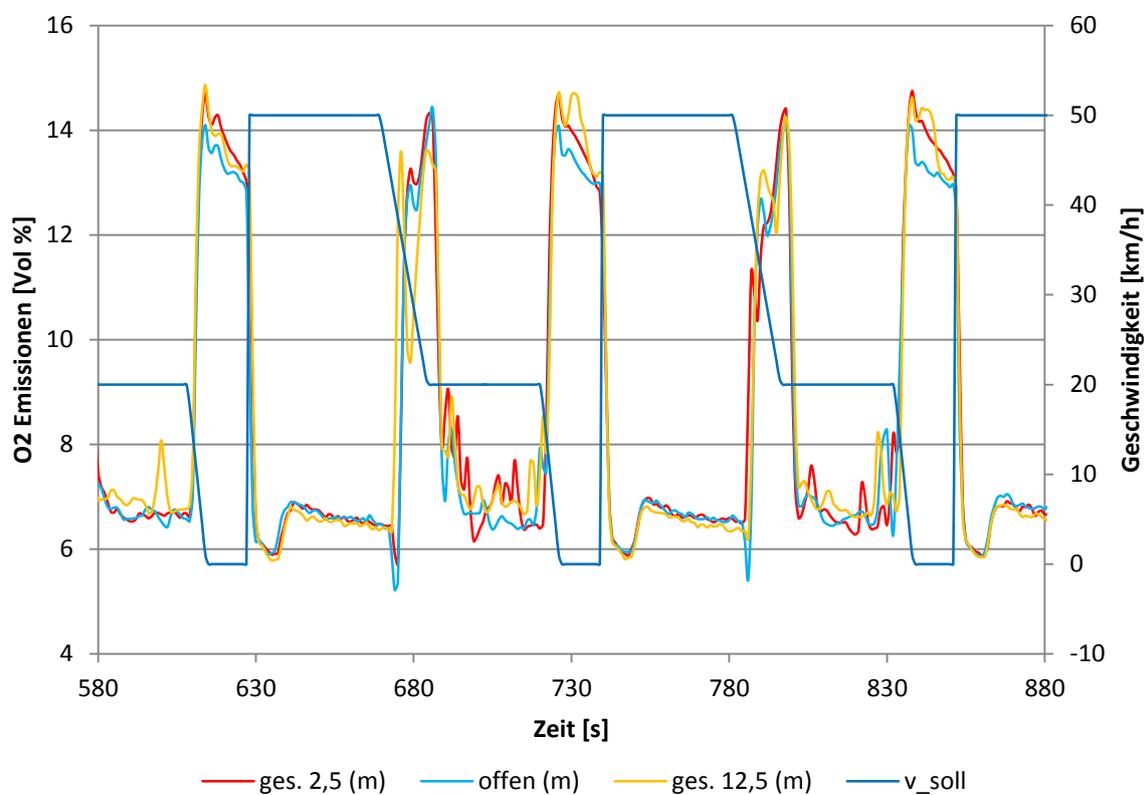


Abbildung 3-45: Gemittelte O2-Konzentration im Rohabgas (Zyklus 6 und 7)

Das Sekundärluftsystem besteht lediglich aus einem Flatterventil, das bei geringstem Unterdruck gegenüber der Umgebung öffnet und so Frischluft in den Abgastrakt gelangen kann, um die Oxidation von HC und CO Emissionen im Katalysator zu verstärken. Bei konstanter Fahrt mit 20 km/h, strömt für alle 3 Ausführungen nahezu gleich viel Luft über das Sekundärluftsystem, unabhängig vom anliegenden mittleren Unterdruck. Die Vermutung liegt daher nahe, dass die dabei gefahrene Drehzahl von 6000 U/min und die damit verbundenen Auslassdruckstöße für die Funktion des Sekundärluftsystems dominierend sind. Abbildung 3-46 zeigt die Frequenzanalyse des Drucksignals bei geschlossener CVS-Anlage. Deutlich erkennbar sind die Druckschwankungen der Verdrängerpumpe mit 33 Hz und die motorseitig herkommenden Abgasdruckstöße mit 100Hz. Die Abgasdruckstöße werden über den Katalysator und den Schalldämpfer abgedämpft und dürften im Abgaskrümmen deutlich stärker ausfallen. Gleiches gilt für die Frequenzanalyse des offenen Systems in Abbildung 3-47. Auch hier treten die motorseitigen Abgasdruckstöße mit 100Hz und fast gleicher Amplitude auf. Die hohe Amplitude bei 200Hz des offenen Systems muss aus der Prü fzelle stammen, da sie über den gesamten Zyklus beobachtet werden konnte.

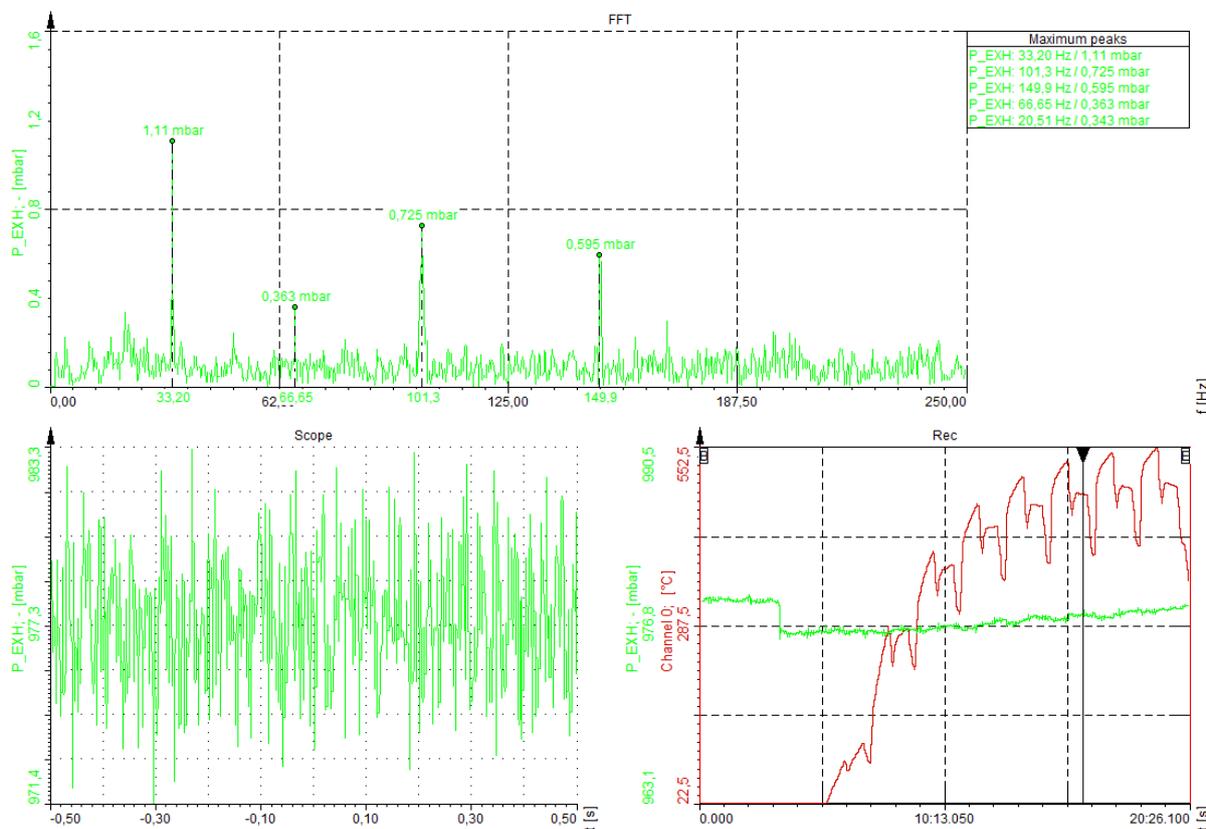


Abbildung 3-46: Frequenzanalyse des Drucksignals bei konstanter Fahrt mit 20 km/h, CVS-Anlage geschlossen mit 2,5mbar Unterdruck

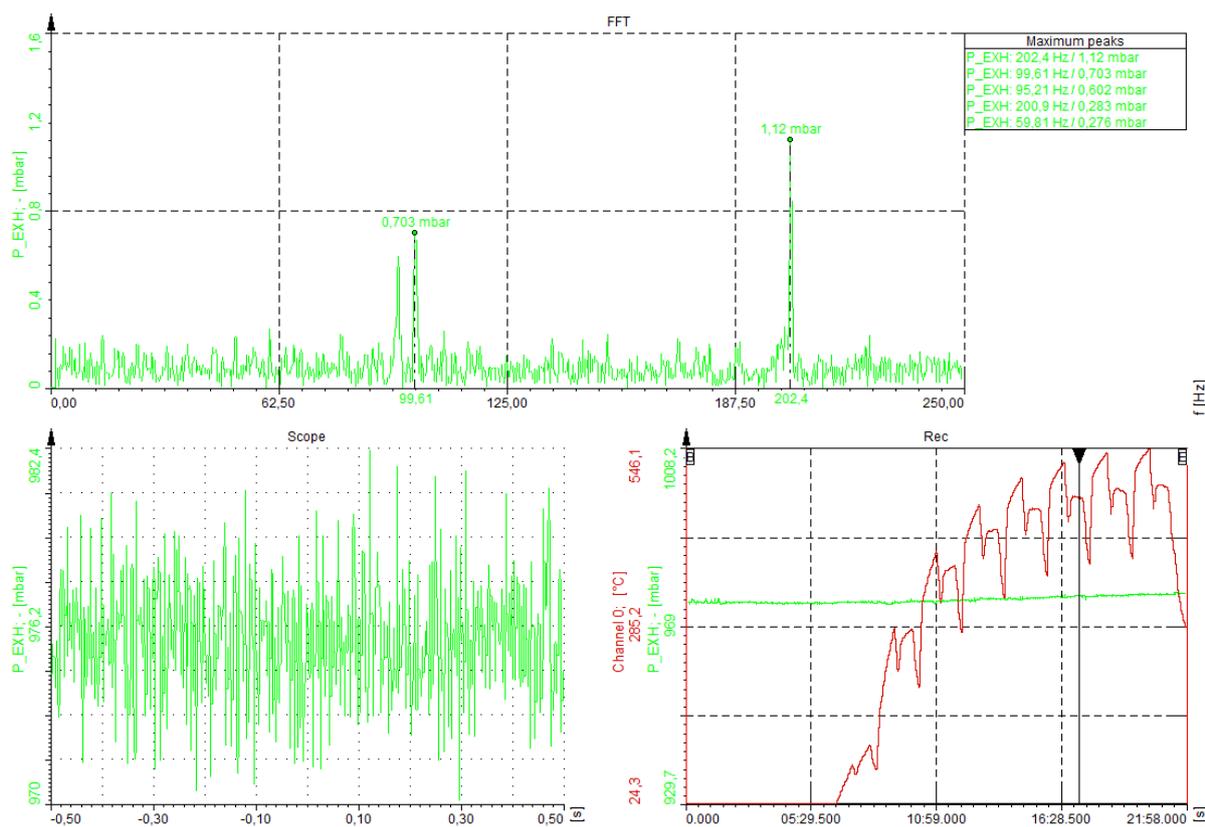


Abbildung 3-47: Frequenzanalyse des Drucksignals bei konstanter Fahrt mit 20 km/h, CVS-Anlage offen

Ein deutlicher Unterschied im Lambdawert zeigt sich hingegen im Leerlauf. Der Abgasstrom ist stark gesunken, wodurch sich kein Abgasgegendruck mehr aufbaut und der Unterdruck der geschlossenen Anlagen sich bis in den Krümmer ausbreiten kann. Dies zeigt sich auch in der Frequenzanalyse des geschlossenen Systems in Abbildung 3-48. Die Druckschwankungen mit der Frequenz der Leerlaufdrehzahl ($\sim 18\text{-}22\text{Hz}$) können sich ungehindert Richtung Auspuffende ausbreiten. Die resultierende Unterdruckwelle befindet sich lang genug unter Umgebungsdruck um reichlich Frischluft über das Sekundärluftsystem anzusaugen. Betrachtet man hingegen die Frequenzanalyse des offenen Systems in Abbildung 3-49, so gleicht das Signal eher einem Rauschen und die Leerlaufdrehzahl taucht nur mit schwacher Amplitude auf. Obwohl der globale Lambdawert nach Abbildung 3-43 auch für das offene System im Leerlauf deutlich über 1 liegt und somit genügend Sauerstoff für die Oxidation von CO vorhanden sein sollte, geschieht dies nicht. Daher liegt die Vermutung nahe, dass der Absolutwert des Lambdawertes, wie bereits erwähnt, angezweifelt werden könnte und das Sekundärluftsystem bei diesem Versuchsträger, bei offener CVS-Anlage, im Leerlauf nicht so gut funktioniert, wie bei der geschlossenen Anlage.

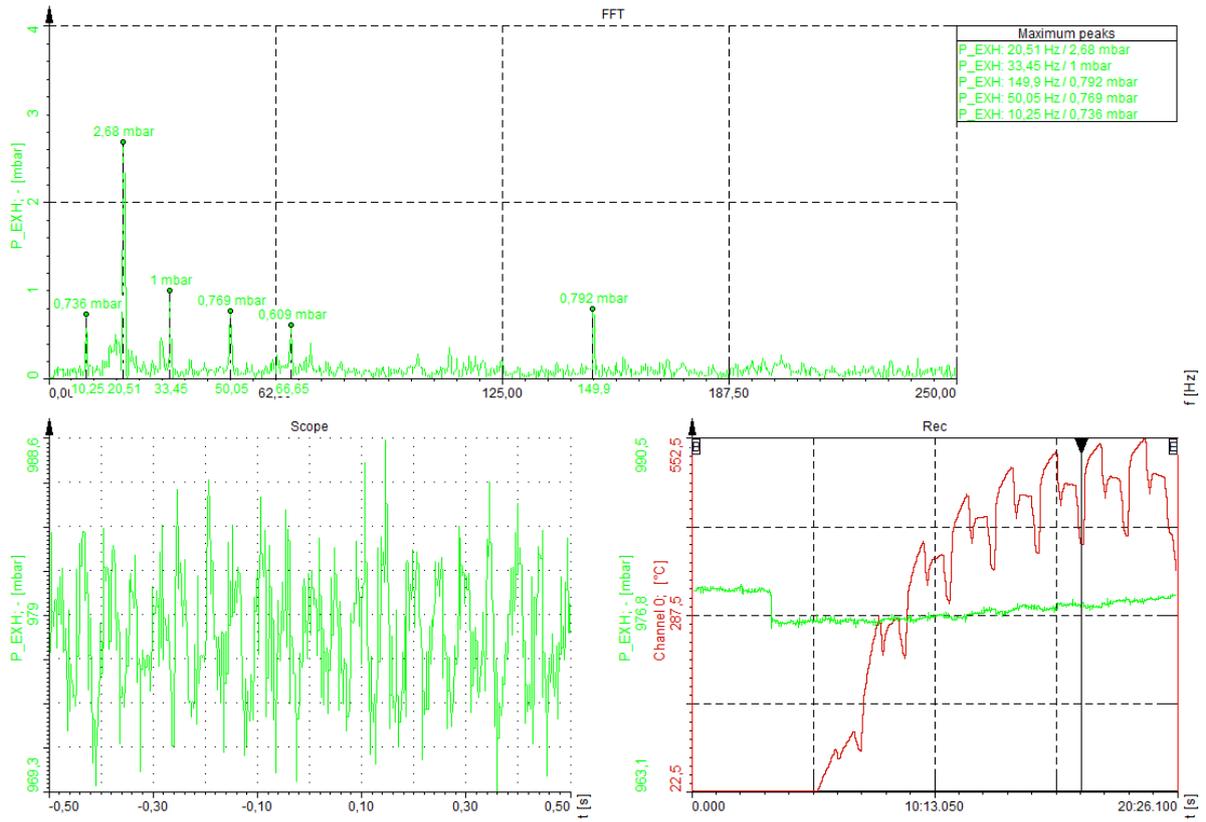


Abbildung 3-48: Frequenzanalyse des Drucksignals im Leerlauf bei geschlossener CVS (2,5mbar)

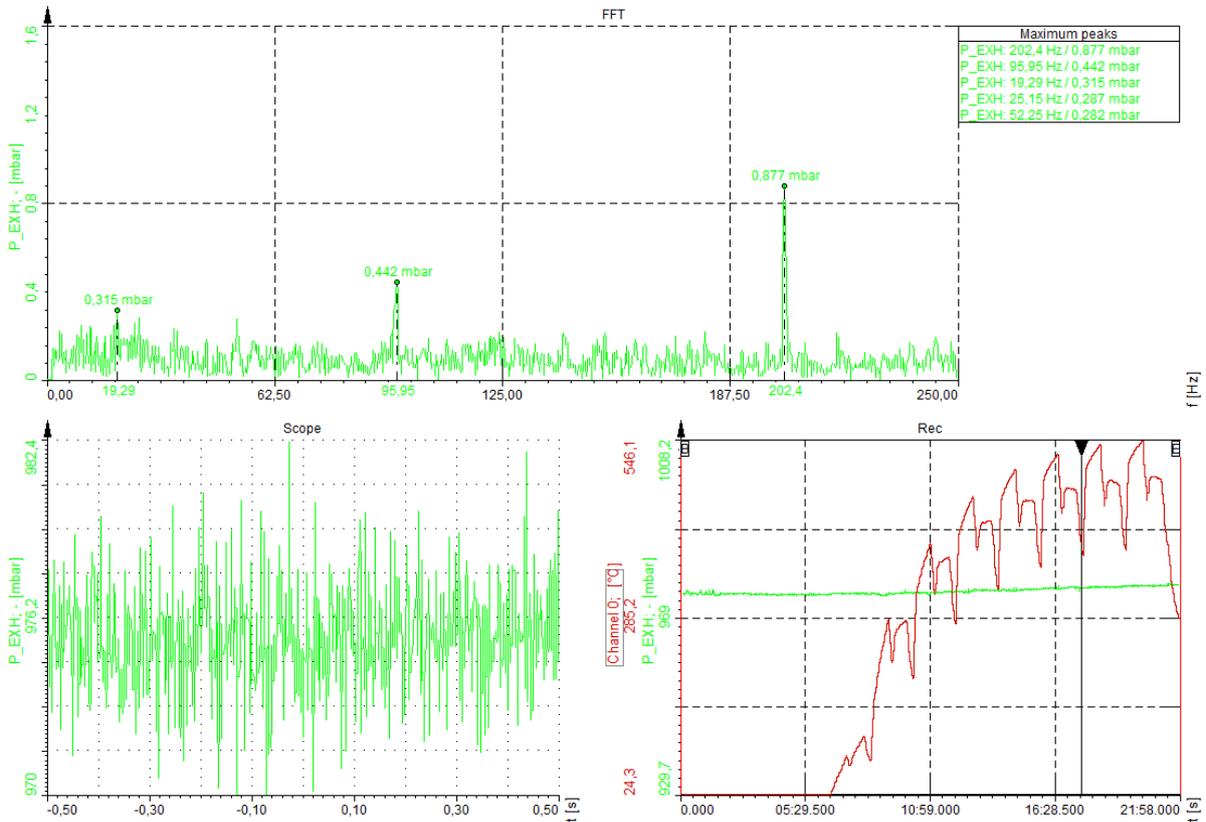


Abbildung 3-49: Frequenzanalyse des Drucksignals im Leerlauf bei offener CVS

3.7.2.3 Einfluss auf die Gasdynamik

Die höheren CO₂ Beutelemmissionen der geschlossenen Anlagen aus Abbildung 3-36 zeigen sich auch im modalen Verlauf der AVL AMA Analyse. Wie in Abbildung 3-50 zu sehen ist, sind die CO₂ Emissionen der geschlossenen Anlagen, mit erhöhtem Unterdruck sogar ansteigend, fast durchgehend höher als bei der offenen Ausführung.

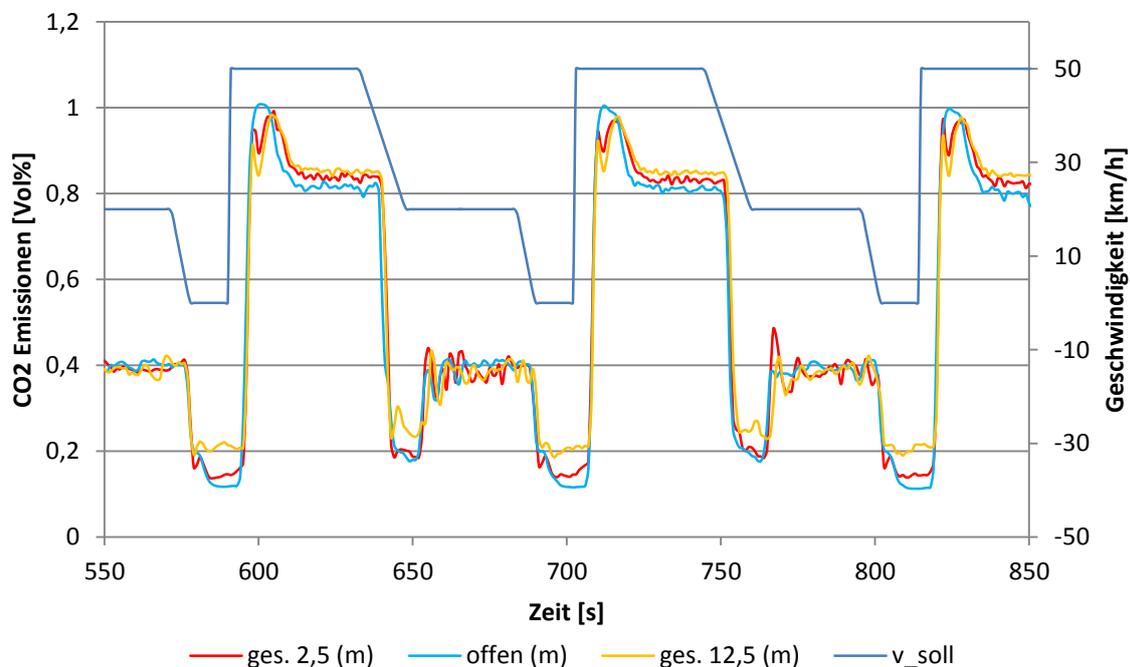


Abbildung 3-50: Gemittelte modale CO₂ Emissionen (Zyklus 6 und 7)

Vergleicht man dies mit den CO₂ Rohemissionen bei konstanter Fahrt mit 45 km/h in Abbildung 3-51, scheinen diese auf einem Niveau zu liegen, wenn nicht sogar mit leicht umgekehrter Tendenz.

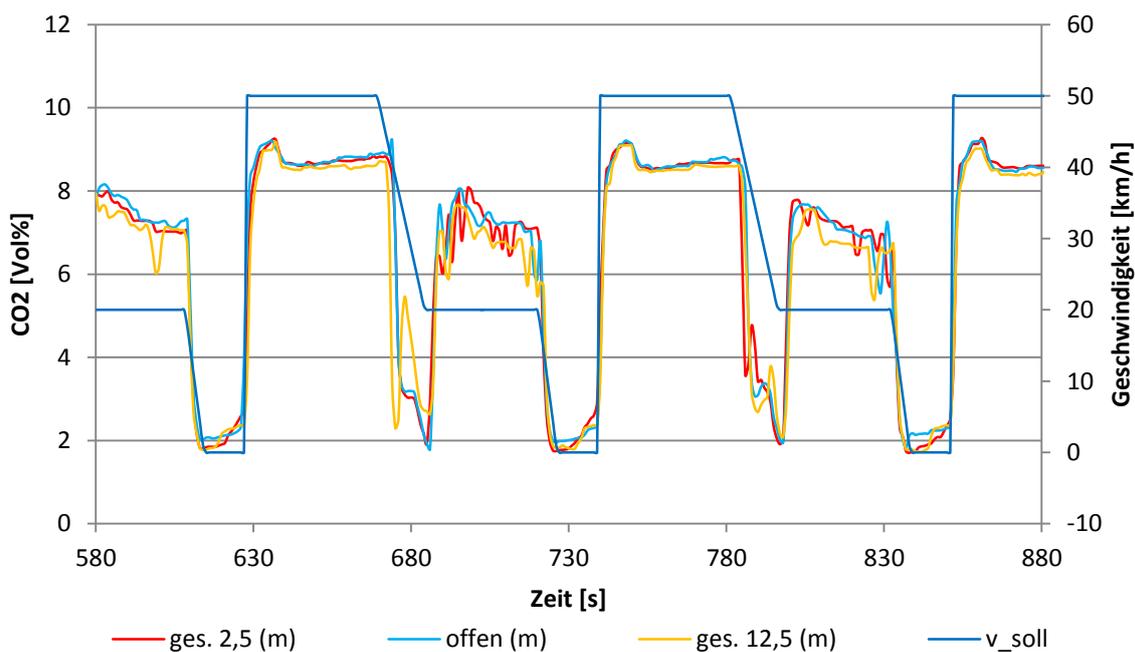


Abbildung 3-51: Gemittelte CO₂-Rohemissionen (Zyklus 6 und 7)

In Bereichen voll geöffneter Drosselklappe und nahezu identischem Lambda, scheint dies nicht eine Folge unterschiedlicher Verdünnung zu sein. Die erhöhte CO_2 Konzentration der geschlossenen Anlagen gegenüber der offenen, bei konstanter Fahrt mit 45 km/h, muss folglich aus katalytischen Reaktionen der HC und CO Rohemissionen im Katalysator herrühren.

Es wird vermutet, dass der erhöhte Unterdruck in der Auspuffanlage die Gasdynamik beim Ladungswechsel beeinflusst und so die Spülverluste erhöht, wodurch mehr unverbrannte HCs direkt in den Abgastrakt befördert werden. Abbildung 3-52 zeigt den Verlauf der Abgastemperaturen hinter dem Katalysator. Die Temperaturen der geschlossenen Systeme sind durchgehend höher als jene des offenen Systems. Was die Annahme einer höheren HC Menge im Abgas der geschlossenen Anlage und deren exotherme Umsetzung im Katalysator bekräftigt. Es sei an dieser Stelle zusätzlich erwähnt, dass die niedrigeren Temperaturen der offenen Anlage auch durch die Anordnung des Trichters und der damit verbundenen zusätzlichen Umströmung des Abgastraktes verstärkt werden können. Bedenkt man jedoch, dass der Auspuff in allen drei Anordnungen in selber Weise vom Fahrtfindgebläse angeströmt wird und diese Luftströmung deutlich überwiegt, wird der Einfluss des Überströmens durch den Trichter der offenen Anlage verschwindend gering sein.

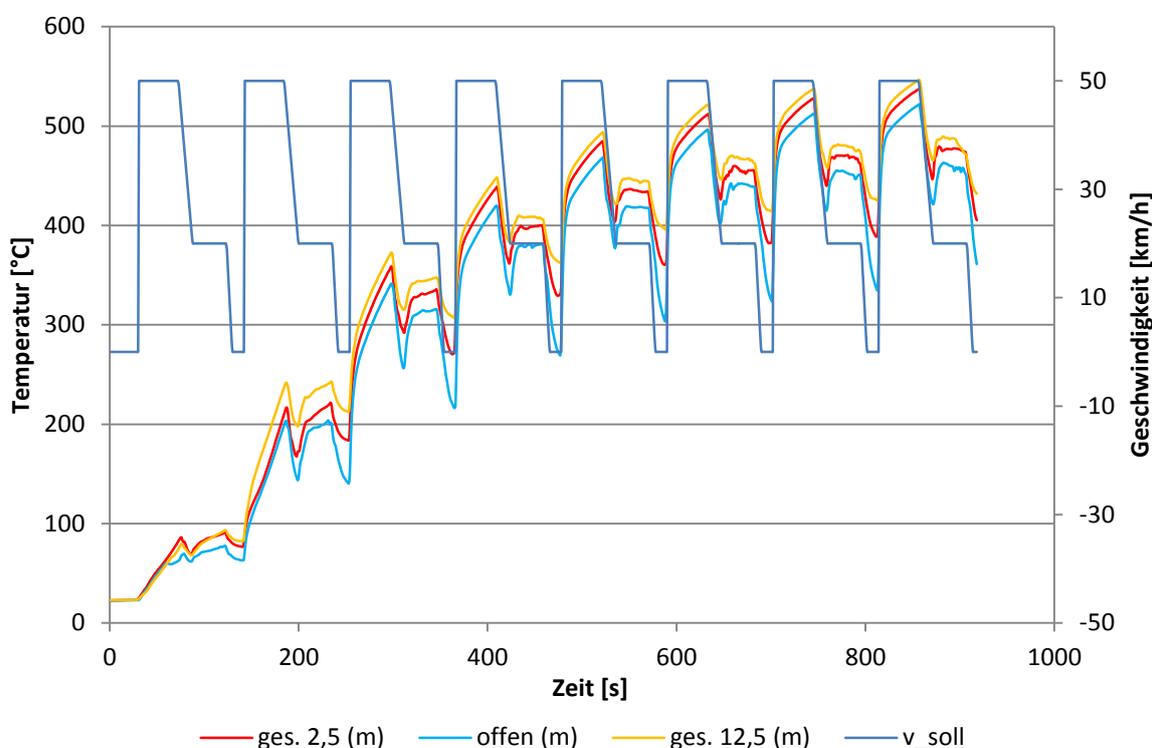


Abbildung 3-52: Gemittelte Abgastemperatur nach Katalysator

Betrachtet man wiederum die Fahrt bei 45 km/h, also bei hohen Drehzahlen und voll geöffneter Drosselklappe, so sieht man weder im Lambdaverlauf (Abbildung 3-43) noch im CO - (Abbildung 3-42) oder HC-Rohemissionsverlauf (Abbildung 3-44) einen Unterschied. Folglich findet hier keine zusätzliche oder verstärkte Verdünnung mit Sekundärluft statt. Wie aber bereits zuvor erwähnt und in [25] nachgewiesen, ist die NDIR/IRD Messmethode, wie sie beim DITEST Anwendung findet, für die Detektion aller HCs im Abgas nicht geeignet. Insbesondere Kohlenstoffaromate mit Doppelbindungen, wie sie verstärkt in Frischladung auftreten, weisen eine schlechte Absorbierung der NDIR Strahlung auf.

“Singer and Harley discovered through correlation of FTIR carbon measurement to NDIR HC measurement that conventional NDIR measurement techniques missed about 50% of the carbon in the exhaust gas HC mix, due to the low NDIR absorption of double-bond Carbon-bearing compounds.”[25]

Die mit dem Unterdruck gestiegenen CO₂ Emissionen aus Abbildung 3-36, ergeben zusammen mit den durchschnittlich zurückgelegten Fahrstrecken einen Mehrverbrauch gegenüber dem offenen System nach Abbildung 3-53.

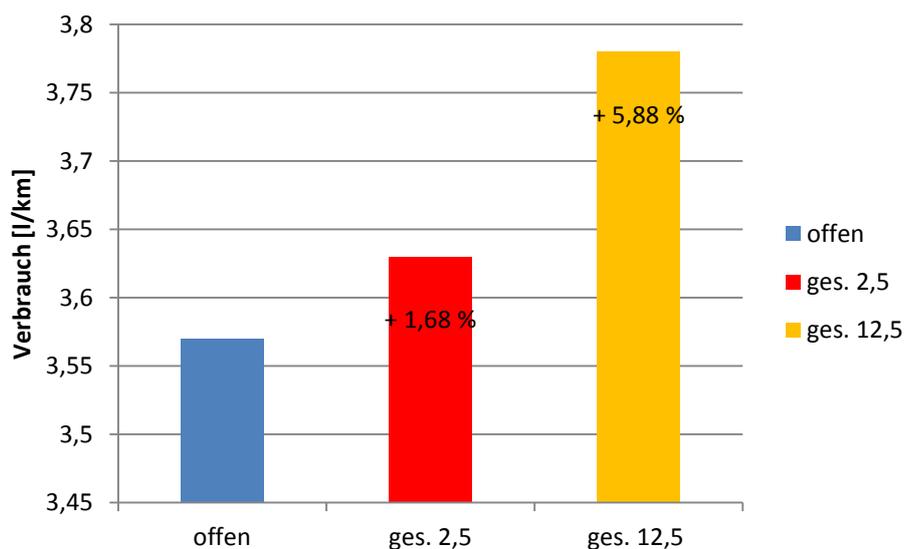


Abbildung 3-53: Verbrauchssteigerung errechnet aus CO₂ Emissionen

Die Untersuchungen haben weitere Fragen aufgeworfen, denen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter nachgegangen werden konnte. Um alle auftretenden Phänomene, beispielsweise die erhöhten CO Emissionen im Leerlauf trotz scheinbarem Luftüberschuss oder die erhöhte CO₂-Konzentration der geschlossenen Anlagen abschließend erklären zu können, bedarf es weiterer Messungen die nicht Ziel dieser Arbeit waren und den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätten. Die vom Gesetzgeber maximal zulässige Druckdifferenz von 12,5 mbar am Auspuffauslass, gegenüber der offenen Anlage, wurde von der geschlossenen Anlage, mit einem mittleren Unterdruck von 2,5 mbar, auch von deren Druckschwankungen eingehalten. Der mittlere Unterdruck von 12,5 mbar wurde hier durch eine weitere Reduzierung der Blende erzwungen. In einer tatsächlich ausgeführten Anlage mit ordnungsgemäßer Wartung, sollte dies nicht möglich sein, da der maximal zulässige Druckabfall über die Verdünnungsluftfilter 2,5 mbar beträgt. Zusätzliche Druckschwankungen können nur durch Resonanzvorgänge, Probenahmepumpen und das CVS Gebläse erzeugt werden. Durch Verwendung von Venturidüsen können die zusätzlichen Druckschwankungen durch das Gebläse und der Beutelprobenahmepumpe eliminiert werden. Übrig bliebe lediglich die Druckschwankungen durch die Probenahmepumpen der PM-Messung und der modalen Entnahme.

3.7.2.4 Totzeitverschiebung

Abbildung 3-54, Abbildung 3-55 und Abbildung 3-56 zeigen die unterschiedlichen Totzeitverschiebungen zwischen offenem und geschlossenem System, die aufgrund unterschiedlicher Leitungslängen entstehen. Die Totzeit des offenen Systems setzt sich aus den Teilstrecken Auspuff bis Entnahmestelle kurz vor dem Rootsgebläse, Entnahmestelle bis Analysator und Analysator totzeit zusammen und beträgt 5-6 Sekunden. Beim geschlossenen System verlängert sich diese aufgrund der zusätzlichen Teilstrecken Auspuff bis Verdünnungstunnel (TT) und Verdünnungstunnel selbst (DT) um weitere 3-4 Sekunden.

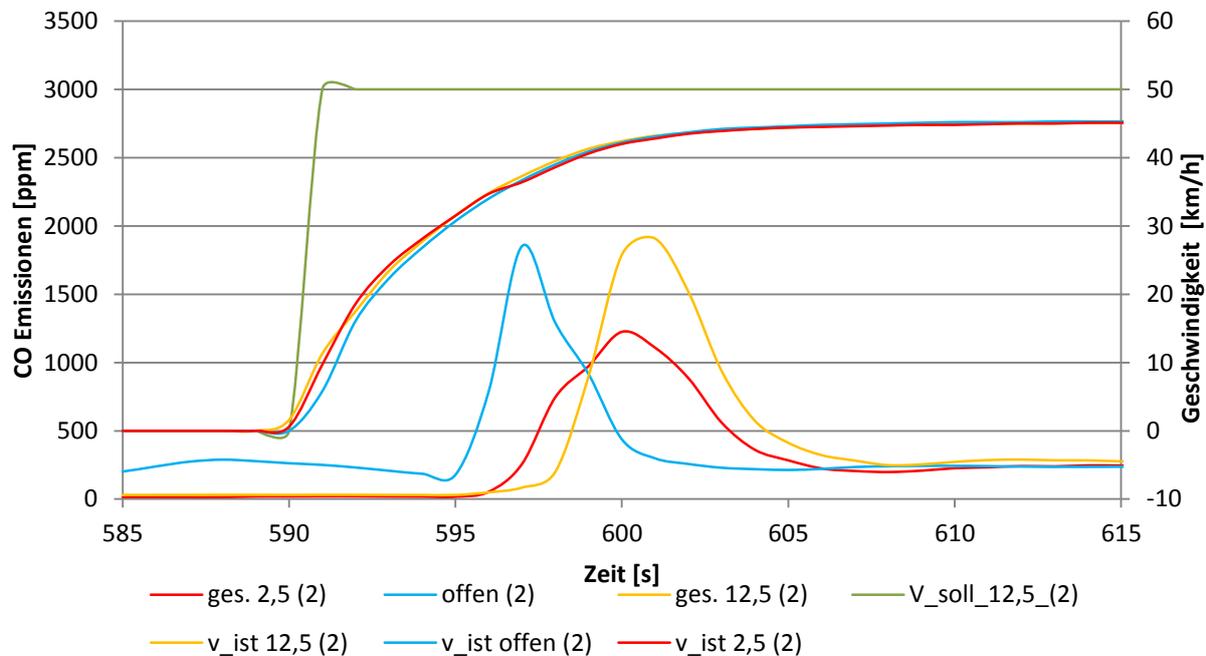


Abbildung 3-54: Totzeit Unterschied bei offener und geschlossener Anlage für CO Emissionen

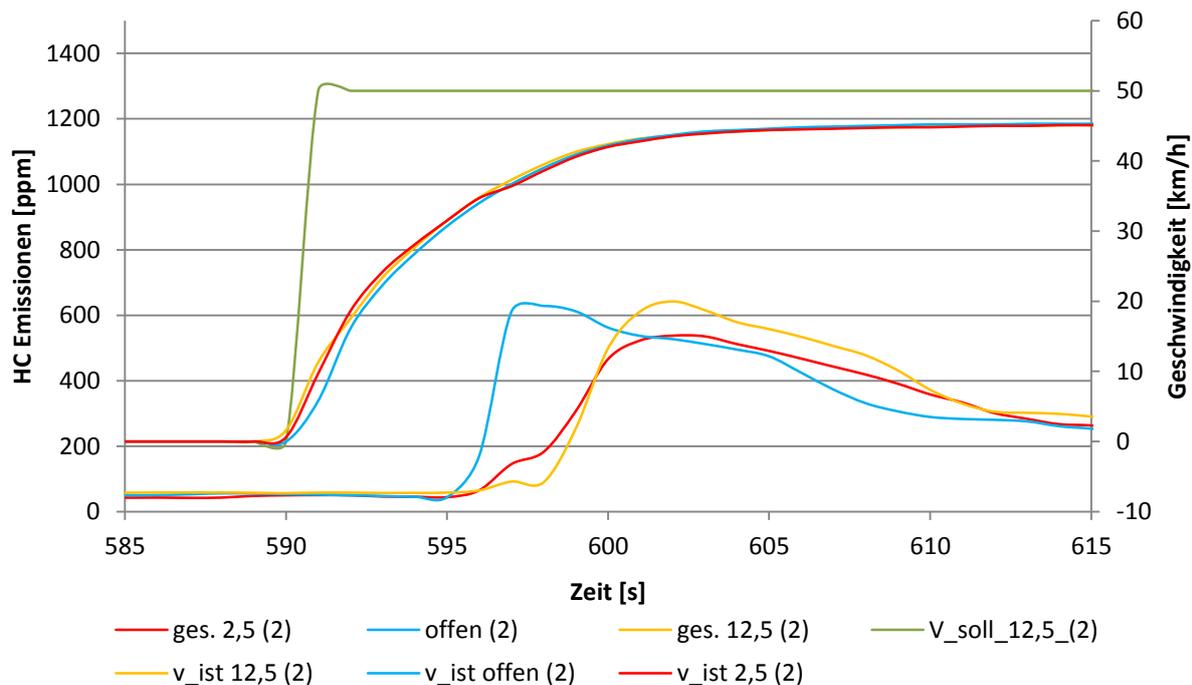


Abbildung 3-55: Totzeit Unterschied bei offener und geschlossener Anlage für HC Emissionen

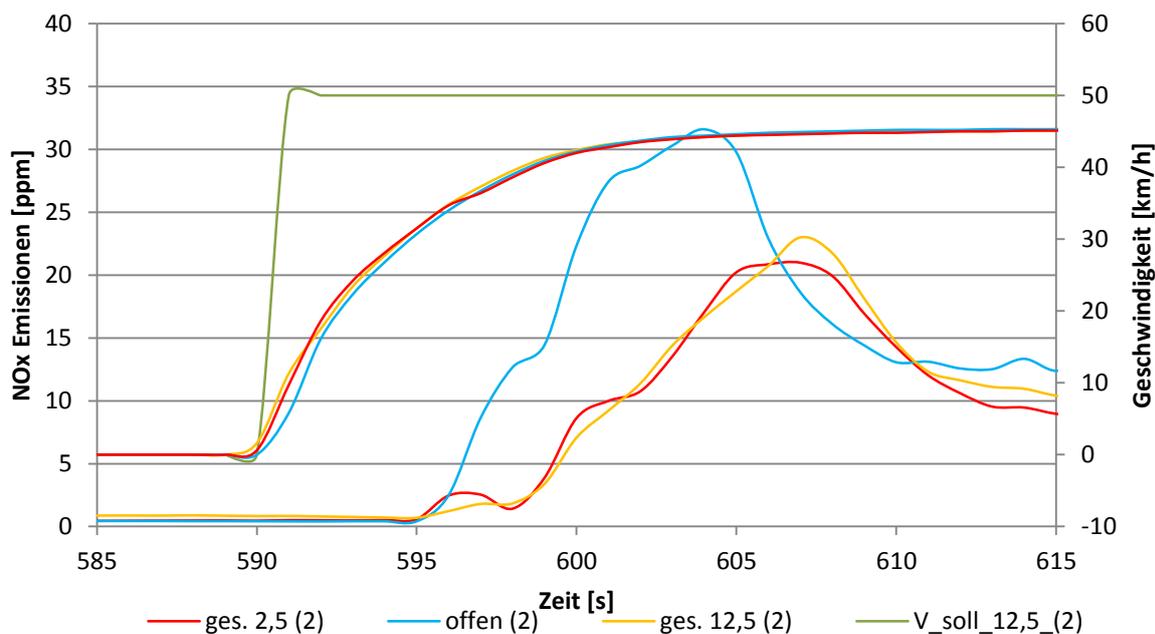


Abbildung 3-56: Totzeit Unterschied bei offener und geschlossener Anlage für NOx Emissionen

Grundsätzlich kann auch ein flacheres Ansteigen der Konzentrationen für die geschlossenen Systeme beobachtet werden. Dies kommt zustande, da sich die Abgase mit hohen Konzentrationen auf dem längeren Weg bis zu den Analysatoren stärker mit den vorangegangenen und nachfolgenden Abgasen mischen.

Erwähnt werden muss, dass im Laufe dieser Vergleichsmessungen eine Kondensatbildung in der CVS Anlage beobachtet werden konnte. Bei der offenen Anlage waren Wassertropfen im Schwebekörper-Durchflussmesser für den Abgasbeutelprobenstrom zu beobachten. Bei den geschlossenen Anlagen kam es am Ende der Verbindungsleitung TT also noch bei unverdünntem Rohabgas zum Auskondensieren von Wasser. Ein Auskondensieren von Rohabgas sollte jedoch zu keinen Veränderungen der Messergebnisse führen, da wegen des konstanten Volumenstroms der CVS-Anlage das Rohabgas um das vom Kondensat verringerte Volumen mit mehr Verdünnungsluft gemischt wird.

4 Anlagen Dimensionierung und Auslegung

Die am Zweiradrollenprüfstand eingesetzte CVS-Anlage soll auf den neusten Stand der Technik gebracht werden oder durch eine neue Anlage ersetzt werden, um den Anforderungen zukünftiger durchgeführter Prüfläufe und Emissionstests zu genügen.

4.1 Grundlegende Anforderungen

Die Anlage muss den Anforderungen der nachstehend aufgeführten Verordnungen und Richtlinien zur Durchführung von Emissionstest genügen.

Tabelle 4-1: Zutreffende Richtlinien und Verordnungen

Verordnungen und Richtlinien	Anwendungsbereich
EU Verordnung Nr 168/2013	Motorräder
EU Verordnung Nr 134/2014	Motorräder
EPA-CFR-part86-subpartE/F	Motorräder
EU Verordnung 2016/1628	„Non-Road“ Motoren
EPA-CFR-part1054	New Small „Non-Road“ SI Engines

Zwei grundlegende Anforderungen haben alle oben genannten Verordnungen gemeinsam:

1. Das Gesamtvolumen des verdünnten Abgases muss gemessen werden können (Messgenauigkeit +/-2%)
2. Der Probenstrom muss kontinuierlich proportional zu diesem sein (Durchsatztoleranz für Partikelprobenstrom +/-5%)

Eine detailliertere Ausarbeitung benötigter Anlagenkomponenten und Regelstrategien sind im vorangegangenen Kapitel Gesetzeslage zu finden.

4.2 PM und PN Messungen

Neben den bisher durchgeführten Emissionstests für gasförmige Schadstoffe, soll das System um eine Einrichtung für die Messung von Partikelmasse (PM) erweitert werden. Die Messung der Partikelmasse ist laut EU Verordnung 168/2013 für CI Motoren (combustion ignition) seit Euro 4 und zusätzlich auch für Benzin DI Motoren (direct injection) ab Euro 5 vorgeschrieben. Detailliertere Anforderungen an das Partikelprobenahmesystem finden sich im Kapitel 2.5 Probenahmesystem für Partikelmasse (PM).

Die Messung der Partikelanzahl ist zum jetzigen Zeitpunkt kein Bestandteil der Zulassungsprüfung, weder für kleine Non-Road Motoren noch für Kategorie-L Fahrzeuge. Dennoch sind kleinste Partikel ($\leq 25\text{nm}$) aufgrund des hohen Gesundheitsrisikos ein relevantes Thema und werden, wenn man die Entwicklung bei PKWs ansieht, mit hoher Wahrscheinlichkeit in Zukunft ebenfalls reglementiert. Deshalb soll eine Vorkehrung zur Adaptierung bzw. Erweiterung der Anlage um eine Einrichtung für Partikelanzahl-Messung (PN) vorgesehen werden, in Anlehnung an die PN Messung für „Light duty vehicles“ nach UN-ECE Reg.83 Anlage 5. Genaueres sowie Untersuchungen zur PN Messung bei Kategorie-L Fahrzeugen kann dem Kapitel 2.6 entnommen werden.

4.3 Verdünnungssystem

Die CVS-Anlage soll ausreichend dimensioniert sein, um alle Fahrzeuge der Kategorie-L abzudecken. Dabei reichen die Hubräume von Zweirädern mit 50ccm bis zu Motorrädern >1500ccm. Darüber hinaus sollen mit derselben Anlage auch Emissionstests für Non-Road Motoren <19kW durchgeführt werden können.

Die schärferen Emissionsgrenzwerte erfordern ein genaues Messen von immer geringeren Konzentrationen und sich angleichenden Beutelkonzentrationen. Um Messfehler möglichst gering zu halten erfordert es

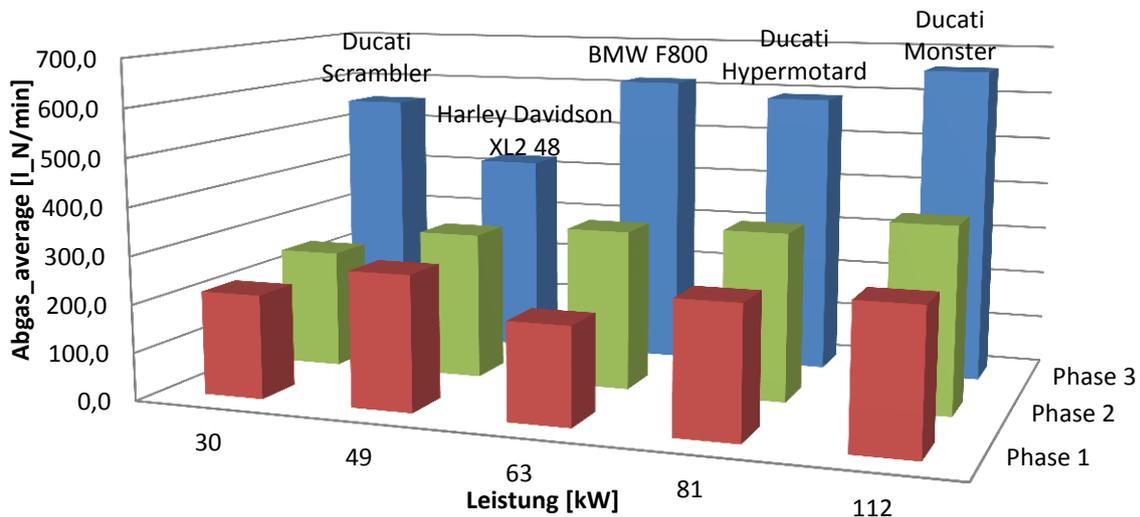
- 1) eine möglichst geringe Verdünnung, um die Konzentration in den Beuteln hoch zu halten
- 2) flexibles Verdünnungssystem hinsichtlich Durchflussrate und Umschaltzeiten
- 3) eine Optimierung/Anpassung des Analyse-Geräts und des Messbereichs

Tabelle 4-2 zeigt die minimal und maximal benötigten Durchflussraten der CVS Anlage. Die Ergebnisse für Motorräder beruhen auf Messwerten an der TU Graz durchgeführter Emissionsmessungen verschiedener Fahrzeuge sowie auf Messergebnissen der „Preparatory work for the Environmental Effect Study on the Euro 5 step of L-category vehicles“ [7] des JRC vom April 2016.

Tabelle 4-2: CVS-Durchsatz Dimensionierung

Minimaler Volumenstrom	Maximaler Volumenstrom	
Ausreichende (nicht zu hohe) Verdünnung von kleinen „sauberen“ Moped Motoren	Ausreichende Verdünnung des maximalen Abgasvolumenstroms während des WMTC Testzyklus von leistungsstarken Motorrädern	Ausreichende Verdünnung der emissionsreichen Abgase von Non-Road Motoren mit $P_{eff}=19kW$
$Q_{min} \approx 500 \text{ l}_N/\text{min}$	$Q_{max} \approx 4500 \text{ l}_N/\text{min}$	$Q_{max} \approx 17000 \text{ l}_N/\text{min}$
Ausreichende Verdünnung bedeutet:		
hoch genug zu wählen, um ein Kondensieren des verdünnten Abgases in weiterer Folge zu verhindern (sieh. EU 134/2014, Anlage 4, 1.3.4.)		
die Absaugung muss 100% der Abgase erfassen		
so gering wie möglich zu wählen um die Konzentration in den Abgasbeuteln zu erhöhen und Messfehler zu minimieren		hoch genug zu wählen, um bei emissionsreichen Motoren innerhalb des Messbereichs der Analyseeinheit zu bleiben

Abbildung 4-1 zeigt die durchschnittlichen Abgasvolumenströme, die sich bei Messungen auf dem Zweiradrollenprüfstand mit verschiedenen Fahrzeugen für den WMTC-Zyklus ergeben haben. Auch bei enormer Leistungssteigerung der Motorräder steigt der durchschnittliche Abgasstrom nur wenig. Dies liegt daran, dass, wie in Abbildung 4-2 ersichtlich, im WMTC nur Leistungen bis ca. 20 kW auftreten. Geht man von einem maximalen durchschnittlichen Abgasvolumenstrom von 750 l_N/min und einem DF_{min}=6 für die Beutelmessung aus, ergibt sich ein maximal benötigter CVS-Volumenstrom von 4500 l_N/min.



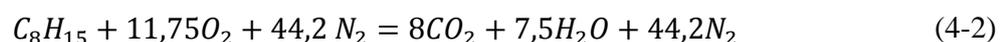
	30	49	63	81	112
Phase 1	216,7	280,5	202,8	270,5	290,1
Phase 2	249,4	307,9	333,5	349,1	383,4
Phase 3	553,5	425,0	616,9	589,6	658,2

Abbildung 4-1: Durchschnittlicher Abgasvolumenstrom unterschiedlicher Fahrzeuge in den 3 Phasen des WMTC 3-2

Die während des WMTC auftretende Leistung von ca. 20 kW entspricht einem maximalen Abgasvolumenstrom, je nach Motorrad von ca. 1500 l_N/min. Damit würde ein kurzzeitiger Verdünnungsfaktor DF=3 auftreten, was jedoch durch Beheizung der Leitungen, wie bereits im Kapitel „Kondensationsbetrachtungen“, keine Gefahr für Wasserausfall darstellt.

Der benötigte höchste Volumenstrom für den Motorenprüfstand ergibt sich aus einer maximalen Auslastung der 19 kW Bremse unter Annahme einer Verbrennung bei λ=1 und einem Wirkungsgrad von η=0,25. Aus einer einfachen Bilanzrechnung nach Gleichung (4-1) kann der Luftbedarf für die Leistungsumsetzung berechnet werden und entsprechend den Gleichungen (4-2) und (4-3) auf den Abgasstrom geschlossen werden.

$$Q_{Luft} = \frac{L_{min} * P_{eff}}{\rho_{Luft} * H_u * \eta_{eff}} \quad (4-1)$$



$$Q_{Abgas} = \frac{59,7}{55,95} Q_{Luft} \quad (4-3)$$

Für die Berechnung des maximalen CVS-Normvolumenstroms wurde der Verdünnungsgrad für den Motorenprüfstand so bestimmt, dass die Emissionswerte aus Tabelle 4-3 bei modaler Messung noch innerhalb der angewandten Messbereiche der Analysatoren aus Tabelle 3-1 liegen. Kritisch sind dabei die CO und HC Emissionen aufgrund des Fettbetriebs von 2-Takt Motoren. Die Annahme einer stöchiometrischen Verbrennung ist somit eine konservative Annahme zur Berechnung des Abgasvolumenstroms.

Tabelle 4-3: Abgaswerte aus Messungen mit einem vergleichbaren Versuchsträger (Handheld)

Komponente	Anteile im Rohabgas
CO ₂ _feucht	9,18%
CO_feucht	4,42%
HC_feucht	1,02%
NO _x _feucht	0,01%

Der deutlich höhere maximal benötigte CVS-Volumenstrom für den Motorenprüfstand, bei nur halber Bremsleistung von 19 kW kommt zum einen daher, dass aufgrund der hohen HC und CO Emissionen deutlich stärker verdünnt werden muss, um innerhalb der Analysatorgrenzen zu bleiben. Zum anderen wurde das Hauptaugenmerk hier auf die modale Messung gelegt, da diese für Entwicklungszwecke von größerer Bedeutung ist. Zudem werden die Motoren wie in Anhang 2 Abbildung 0-1 ersichtlich, im Prüfzyklus für eine gewisse Zeit bei Vollast betrieben. Die 19 kW entsprechen nach obiger Abschätzung einem Abgasstrom von ca. 1330 l_N/min. Bei einer CO Rohemission nach Tabelle 4-3 von 4,42 % und einem AMA Overflow ab 3500 ppm (Tabelle 3-1) wäre demnach ein DF von 12,6 nötig. Dies ergibt die in Tabelle 4-2 angegebenen 17000 l_N/min.

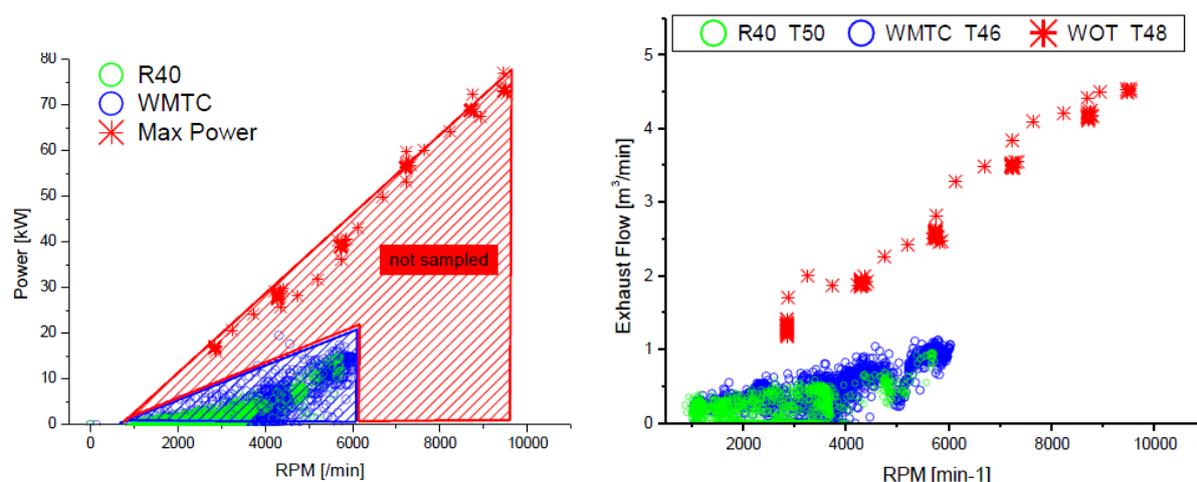


Abbildung 4-2: Fahrzeugleistung und Abgasstrom über Drehzahl für verschiedene Testzyklen.
Testfahrzeug H=900 ccm, P=100 kW, v_{max} > 150 km/h [7]

Um die CVS-Anlage aber auch für die Nachstellung anderer Fahrzyklen nutzen zu können, sollte die Anlage in jedem Fall größer dimensioniert werden. Die rechnerische Abschätzung sowie Abbildung 4-2 lassen erahnen, dass bei Vollauslastung der 40kW Rollenleistung momentane

Abgasströme von ca. 3000 l_N/min auftreten können. Von einer Verdoppelung des durchschnittlichen Abgasvolumenstromes durch andere Fahrzyklen gegenüber dem WMTC-Zyklus ist jedoch nicht auszugehen. Fraglich ist ebenfalls ob es sinnvoll ist, dass die Dimensionierung zur vollen Auslastung des Motorenprüfstandes geschieht. Ein maximaler CVS Volumenstrom von 7500 l_N/min würde entsprechend den zuvor gemachten Annahmen für den Motorenprüfstand und Emissionskonzentrationen eine ausreichende Verdünnung für Motoren bis 8,5 kW darstellen.

Es wird daher empfohlen für die CVS-Anlage einen maximalen Durchsatz von 7500 l_N/min mit möglichst feiner Abstufung zur Anpassung an den jeweiligen Abgasvolumenstrom vorzusehen. Der maximale CVS Volumenstrom muss mit der Abgasabsaugung über das Dach abgestimmt werden, um ein Zurückströmen über die motorenprüfstandsseitige Absaugung zu verhindern.

Das in Kapitel 2.3.2 „Kritisch durchströmtes Venturirohr (CFV-CVS)“ beschriebene CVS-System ist der Verdrängerpumpe (PDP) gegenüber, aus folgenden Gründen, zu bevorzugen:

- Mit einer Parallelschaltung von 4 Venturidüsen (500, 1000, 2000, 4000 l_N/min) können beispielsweise 15 unterschiedliche Durchsätze realisiert werden. Beginnend von 500 l_N/min bis 7500 l_N/min, mit einer feinen Abstufung von nur 500 l_N/min für eine, im Bedarfsfall optimale Anpassung an das jeweilige Fahrzeug. Für die Realisierung von 15 unterschiedlichen Durchsätzen müssen jedoch nur 4 Venturidüsen kalibriert werden. Bei einer Verdrängerpumpe hingegen müssten alle 15 Durchsatzstufen kalibriert werden.
- Durch das Freigeben bzw. Schließen der Venturidüsen mittels geeigneter Ventile können sehr schnelle Umschaltzeiten realisiert und so der Durchsatz während eines Zyklus für die unterschiedlichen Zyklusphasen angepasst werden. Dies kann bei gleichbleibendem Probennahmestrom jedoch nur bei einem Beutelwechsel für die verdünnten Abgase erfolgen, um die kontinuierliche Proportionalität während einer jeden Phase bzw. Beutelbefüllung zu gewährleisten. Beim Einsatz eines Probenstromregelgeräts (MFC) wäre ein Umschalten des CVS Durchsatzes jederzeit möglich.
- Wird gleichzeitig eine weitere, durchgehend kritisch betriebene Venturidüse für die Probennahme verwendet und geschieht dies in der Nähe der Hauptventuridüse, sprich bei derselben Temperatur und demselben Druck, so ist die Probennahme in jedem Fall proportional. Auf eine aufwändige Regelung des Probenstroms kann so verzichtet werden.
- Die Massen-/Volumenstrommessung mittels Venturirohren ist hochgenau. Die Venturirohre/-düsen sind sehr robust und wartungsfrei.
- Durch einen modularen Aufbau der Venturimatrix ist eine Adaptierung der Anlage für später Eventualitäten leicht möglich.
- Für den Einsatz als Gebläse kann prinzipiell jede Pumpe oder Turbogebläse zum Einsatz kommen, dass das erforderliche, kritische Druckverhältnis auch bei maximalem Durchsatz aufrechterhält.

Ein weiterer Vorteil des Venturiprinzips ist es, dass Druckschwankungen vom Gebläse oder der Vakuumpumpe stromabwärts der Düse keinen Einfluss auf den Volumen- oder Massenstrom haben, solange ein kritisches Druckverhältnis an der Düse herrscht. Druckschwankungen können sich auch nicht gegen die Strömungsrichtung über das Venturirohr hinweg ausbreiten und haben somit keinen Einfluss auf den Abgasgedruck im Abgasendrohr des Fahrzeugs. Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft eine Düsengalerie wie sie auch für die CVS-Anlage eingesetzt werden kann.

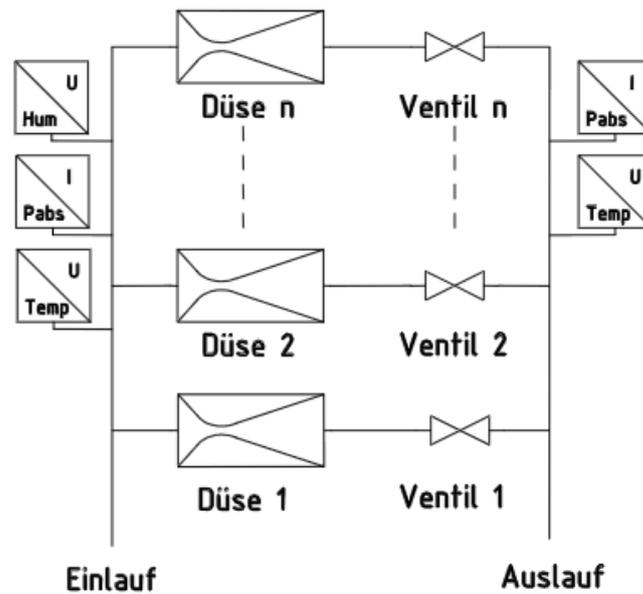


Abbildung 4-3: Beispiel einer Düsengalerie [24]

Zur Bestimmung des momentanen Volumenstroms müssen der absolute Druck, die Temperatur und die relative Feuchte des verdünnten Abgases vor Eintritt in die Venturidüse kontinuierlich mitgemessen werden. Aus diesen Messdaten wird der momentane Durchfluss bestimmt. Das Aufintegrieren des momentanen Durchsatzes über einen Zyklusteil liefert den Gesamtvolumenstrom der CVS Anlage, der in weiterer Folge zur Berechnung der über den Zyklusteil insgesamt emittierten Abgaskomponenten herangezogen wird. Der Massenstrom bzw. Normvolumenstrom durch ein Venturirohr lässt sich nach Gleichung (4-4) berechnen. Dabei signalisiert der Sternindex den Zustand im Halsquerschnitt der Düse. Die Geschwindigkeit im engsten Querschnitt entspricht der Schallgeschwindigkeit nach Gleichung (4-5). Die Dichte im Halsquerschnitt lässt sich entsprechend der idealen Gasgleichung (4-6) umschreiben.

$$\dot{m} = A^* \cdot c^* \cdot \rho^* \quad (4-4)$$

$$c^* = \sqrt{\kappa R_S T^*} \quad (4-5)$$

$$\rho^* = \frac{p^*}{R_S T^*} = \frac{M_L \cdot p^*}{R \cdot T^*} \quad (4-6)$$

Mit Hilfe der isentropen Beziehungen, Gleichungen (4-7) und (4-8), können die schwer zu messende Halstemperatur (T^*) und der Halsdruck (p^*) auf totalen Druck (p_{t0}) und totale Temperatur (T_{t0}) vor der Venturidüse übergeführt werden.

$$\frac{p^*}{p_{t0}} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa + 1}} \quad (4-7)$$

$$\frac{T^*}{T_{t0}} = \left(\frac{p^*}{p_{t0}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{2}{\kappa + 1} \quad (4-8)$$

Demnach ergibt sich der Massenstrom durch die Düse nach Gleichung (4-9). Dabei sind mit K einige Konstanten zusammengefasst. C_d ist ein Korrekturfaktor dafür, dass der statische Druck (p_0) und die statische Temperatur (T_0) statt den Totalen gemessen werden.

$$\dot{m} = A^* * p_0 * K * C_d * \sqrt{\frac{M_L}{R * T_0}} \quad (4-9)$$

Bei Kalibrierung der Düse mit dem Betriebsgas, unter Betriebsbedingungen, kann auf den „discharge coefficient“ C_d verzichtet werden. Auch bei einem Beta-Verhältnis (Halsdurchmesser zu Rohrdurchmesser stromaufwärts) von kleiner 0,25 kann auf die C_d Korrektur verzichtet werden. Vernachlässigt man des Weiteren, dass die relative Feuchte des verdünnten Abgases während des Zyklus schwankt und man somit die molare Masse als konstant annimmt, ergibt sich die Gleichung (4-10) wie sie auch aus der EU Verordnung 134/2014 bekannt ist.

$$\dot{m} = K * \frac{p_0}{\sqrt{T_0}} \quad (4-10)$$

Wenn sich die Betriebstemperatur des verdünnten Abgases von der Kalibriertemperatur der Venturidüse wesentlich unterscheidet, muss eine Korrektur vorgenommen werden. Mit steigender Temperatur steigt auch die Schallgeschwindigkeit des verdünnten Abgases entsprechend der Gleichung (4-5). Gleichzeitig sinkt aber auch die Dichte des verdünnten Abgases entsprechend der Gleichung (4-6). In Summe führt ein Temperaturanstieg zu einer Verringerung des Massenstromes (Normvolumenstromes Q) durch die Venturidüse. Gleichung (4-11) zeigt den Zusammenhang des Normvolumenstromes Q(T) durch die Venturidüse und der Abgastemperatur.

$$\frac{Q(T_1)}{Q(T_0)} = \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \quad (4-11)$$

Damit ergibt sich bei einer Endtemperatur des verdünnten Abgases von $T_1=80^\circ\text{C}$ (vgl. Abbildung 3-5) vor der Venturidüse eine Verminderung des Durchflusses $Q(T_1)$ gegenüber dem ausgelegten Durchfluss $Q(T_0=0^\circ\text{C})$ um den Faktor $f=0,88$. Dies führt dazu, dass der Verdünnungsgrad um denselben Faktor abnimmt, was bei Zyklusteilen mit hohen Geschwindigkeiten und hohen Temperaturen gefährlich hinsichtlich Kondensatbildung werden kann. Bei der Auslegung der Venturidüsen muss diese Tatsache berücksichtigt und die Durchflüsse entsprechend vergrößert werden. Bei Verwendung eines Wärmetauschers kann auf diesen Korrekturfaktor verzichtet werden, jedoch beutet dies einen deutlichen Mehraufwand und Platzbedarf.

Eine erste Abschätzung des Halsdurchmessers der Venturidüsen mit der Software ORI-FlowCal der Firma TetraTec liefert folgende Ergebnisse in Tabelle 4-4.

Tabelle 4-4: Abschätzung Venturidüsen Halsdurchmesser

	Durchsatz @ NB [l_N/min]	Halsdurchmesser [mm]
1.Düse	500	8,5
2.Düse	1000	12
3.Düse	2000	17
4.Düse	4000	24
Summe	7500	

Das Mitmessen der relativen Feuchte wird in der Verordnung 134/2014 weder vorgeschrieben noch erwähnt. Aufgrund der stark schwankenden Verdünnung, schwankt auch die relative Feuchte des verdünnten Abgases, was wiederum einen Einfluss auf den Durchsatz durch die Venturidüsen hat. Bei einer Kalibrierung der Venturidüsen mit Umgebungsluft ($T=25^{\circ}\text{C}$ und $\varphi=50\%$) kommt es zu starken Abweichungen vom Feuchtegehalt im realen Betrieb. Die Berechnung des entstehenden Fehlers kann Anhang 3 entnommen werden. Die Tabelle 4-5 zeigt den Fehler der sich bei der Vernachlässigung der relativen Feuchtemessung ergibt.

Tabelle 4-5: Fehler bei Vernachlässigung der relativen Feuchtemessung

Verdünnungsfaktor [-]	Fehler in [%]
2	-1,177
6	-0,384
10	-0,226
20	-0,108
40	-0,049

Die in der Verordnung 134/2014 Anlage 4, Unterpunkt 1.3.5 geforderte Messgenauigkeit der Durchsatzmeseinrichtung von +/- 2% wird zwar eingehalten, dennoch sollte eine zusätzliche Feuchtemessung zur Kompensierung dieses Fehlers in Betracht gezogen werden.

Um sicher zu gehen, dass der gemessene Durchfluss nicht durch ein undichtiges Ventil eines abgeschalteten Venturirohres verfälscht wird, sollte eine Dichtheitskontrolle vorgesehen werden. Wie in Abbildung 4-4 dargestellt, werden dazu zwei Absperrventile (Ventil 1 & 2) hinter der Venturidüse in Serie geschaltet. Dazwischen befinden sich ein Drucksensor sowie eine Zusatzleitung, die mit Hilfe eines dritten Absperrventils (Ventil 3) den Druck zwischen den beiden Hauptventilen auf ein Niveau zwischen dem Eingangs- und Ausgangsdruck einstellt. Anschließend sperrt auch Ventil 3 dicht ab. Nun wird der Druck zwischen den Absperrventilen zeitlich beobachtet. Sinkt der Druck unerwartet stark, so ist Ventil 2 undicht. Steigt der Druck unerwartet stark an, so sind entweder Ventil 2 oder 3 undicht.

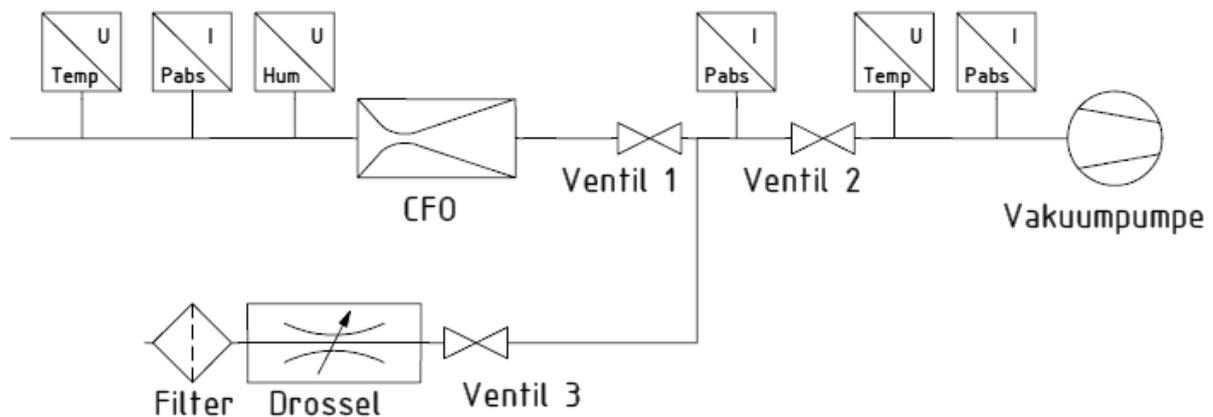


Abbildung 4-4: Block & Bleedverfahren zur Dichtheitskontrolle [24]

4.4 Totzeit

Die Totzeit beschreibt jene Zeit, die es benötigt bis das Abgas, das den Brennraum verlässt von den Analysegeräten gemessen wird. Die Totzeit ist besonders wichtig, um die modal gemessenen Konzentrationen dem jeweiligen Motorbetriebspunkt zuordnen zu können. Um eine Vermischung der Abgase während des Durchströmens möglichst gering zu halten, werden die Rohrleitungen (TT, DT, Probenahmeleitungen) so klein und kurz wie möglich gehalten.

Eine besondere Herausforderung stellt dabei das Verbindungsstück (TT) vom Auspuff zum Verdünnungstunnel dar, da bei einer geschlossen ausgeführten Anlage der Abgasstrom durch dieses, abhängig vom Fahrzyklus, ständig schwankt. Ab der Mischung mit der Verdünnungsluft, sorgt der nahezu konstante Volumenstrom durch die Venturidüsen für gleichbleibende Totzeiten von der Mischstelle bis zu den Analytoren.

4.5 Überprüfung des Gesamtsystems

Die Hauptherausforderung bei sinkenden Emissionswerten liegt nicht im Messbereich der Analysegeräte sondern vielmehr in den sich immer weiter angleichenden Konzentrationswerten der Abgas- und Verdünnungsluftbeutel. [11]

Nach Verordnung EU 134/2014, Anlage 4, Unterpunkt 3 kann zur Überprüfung des Gesamtsystems entweder eine kritisch durchströmte Messblende oder ein gravimetrisches Verfahren in Kombination mit einem reinen Gas verwendet werden. Die höchstzulässige Abweichung zwischen eingeleiteter und gemessener Gasmenge beträgt 5 %.

In der amerikanischen Verordnung für die Emissionsmessung von Motorrädern [1] wird eine Gesamtgenauigkeit von 2% gefordert.

4.6 Systemspülung

Um eine Verunreinigung des Messgases durch Gasrückstände vorangegangener Messungen zu vermeiden, sollte das System nach und vor jeder Prüfung gespült werden. Da die CVS-Anlage auch für den Motorenprüfstand eingesetzt werden soll und die Prüflinge auf diesem unter Umständen über keine Abgasnachbehandlung verfügen, muss die Anlage nach dem Gebrauch mit solchen besonders gut gespült werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, wie in Abbildung 3-12 angedeutet, eine eigene Entnahmeleitung für besonders hohe Rohemissionen vorzusehen.

4.7 Steuerung

Die Anlage soll über eine eigene SPS-Steuerung verfügen und nur Input Signale vom Tornado erhalten. Dabei müssen die minimalen Frequenzen für Datenerfassung sowie für Steuer- und Regelbefehle nach Kapitel 2.8 beachtet werden.

4.8 Packaging

Am betrachteten Prüfstand ist sowohl ein Motorenprüfstand mit einer Leistung bis 20 kW als auch ein Rollenprüfstand mit 40 kW Nennleistung untergebracht. Beide sollen für Emissionsuntersuchungen mit ein- und derselben CVS-Anlage betrieben werden können. Besondere Aufmerksamkeit gilt beim geschlossenen System der Verdünnungsluft-Konditioniereinheit, die aufgrund des geringen zulässigen Druckabfalls von nur 2,5 mbar ausreichend groß dimensioniert werden muss. Weitere platzbedürftige Anlageninstrumente sind der Verdünnungslufttunnel selbst, der Zyklonabscheider, die Venturimatrix und natürlich das CVS-Gebläse. Wegen des beschränkten Platzangebotes am Prüfstand, sollte in nächster Instanz die Komponentendimensionierung weiter fortgeführt werden und ein Rauml layout erstellt werden.

Der Mindestdurchmesser des Verdünnungstunnels von 200mm, setzt einen CVS Volumenstrom von 1000 l_N/min voraus, um bei Mediumstemperaturen bis 200°C die geforderte Reynoldszahl von mindestens 4000 einzuhalten. Um das kritische Druckverhältnis für die Venturidüsen aufrecht zu erhalten, wird das CVS-Gebläse deutlich größer ausfallen als das bisherige. Auch dessen elektrische Leistung steigt auf ca. 10 kW.

5 Konzeptstudie

Basierend auf den gesetzlichen Rahmenbedingungen und den vorangegangenen Berechnungen, werden im folgenden Kapitel verschiedene Konzepte für die CVS Anlage vorgestellt. Die Referenzliste befindet sich am Ende der Schemata.

Geschlossene Anlage

Abbildung 5-1 zeigt ein mögliches Schema für eine geschlossene CVS-Anlage. Aufgrund der Möglichkeit der Konditionierung der Verdünnungsluft sowie erzielbarer geringerer Verdünnungsgrade und damit einer verbundenen Erhöhung der Beutelkonzentrationen ist die Anlage geschlossen ausgeführt. Der Hauptdurchsatz wird über eine Vakuumpumpe und eine Venturi-Matrix realisiert und gemessen. Nicht durchströmte Venturidüsen werden durch ein redundant ausgeführtes Magnetventil verschlossen. Die Möglichkeit der Dichtheitskontrolle (Block & Bleed) nach Abbildung 4-4 bleibt offen.

Für geringe Totzeiten ist die modale Entnahme so früh wie möglich angebracht, jedoch spät genug um eine 100 prozentige Durchmischung zu gewährleisten. Die Probenahme- und Transferleitung wird zur Sicherheit gegen Kondensation mittels einer Begleitheizung auf einer Temperatur von $T > 50^{\circ}\text{C}$ gehalten. Ebenso wird für die Realisierung geringster Verdünnungsgrade der Verdünnungstunnel, bis hin zu den Venturidüsen mit einer Begleitheizung und Isolierung versehen. Um das in Kapitel 2.4 „Gasprobenahmesystem“ beschriebene Phänomen des HC-Hangups zu vermeiden, wurde in Abbildung 5-2 eine Hochtemperatur-Variante für die modale Probenahmeleitung skizziert. Jedoch ist, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, die aktuell eingesetzte Abgasanalyseeinheit für derartig hohe Temperaturen nicht geeignet.

Bei den Abgasbeuteln reicht aufgrund einer größeren mittleren Verdünnung, eine Beheizung auf 30°C aus. Um das dabei auftretende Outgassing zu berücksichtigen, werden auch die Verdünnungsluftbeutel auf 30°C beheizt. Um einen proportionalen Beutelprobenstrom sicherzustellen, wurde statt einer elektronischen Durchflussregulierung eine weitere Venturidüse (Probendüse) eingesetzt. Aus Proportionalitätsgründen muss darauf geachtet werden, dass die gleichen Eintrittsbedingungen an allen Venturidüsen nicht durch unterschiedliche Beheizung der Leitungen verändert werden. Für eine größere Flexibilität kann eine elektronische Durchflussregelung wie in Abbildung 5-3, verwendet werden.

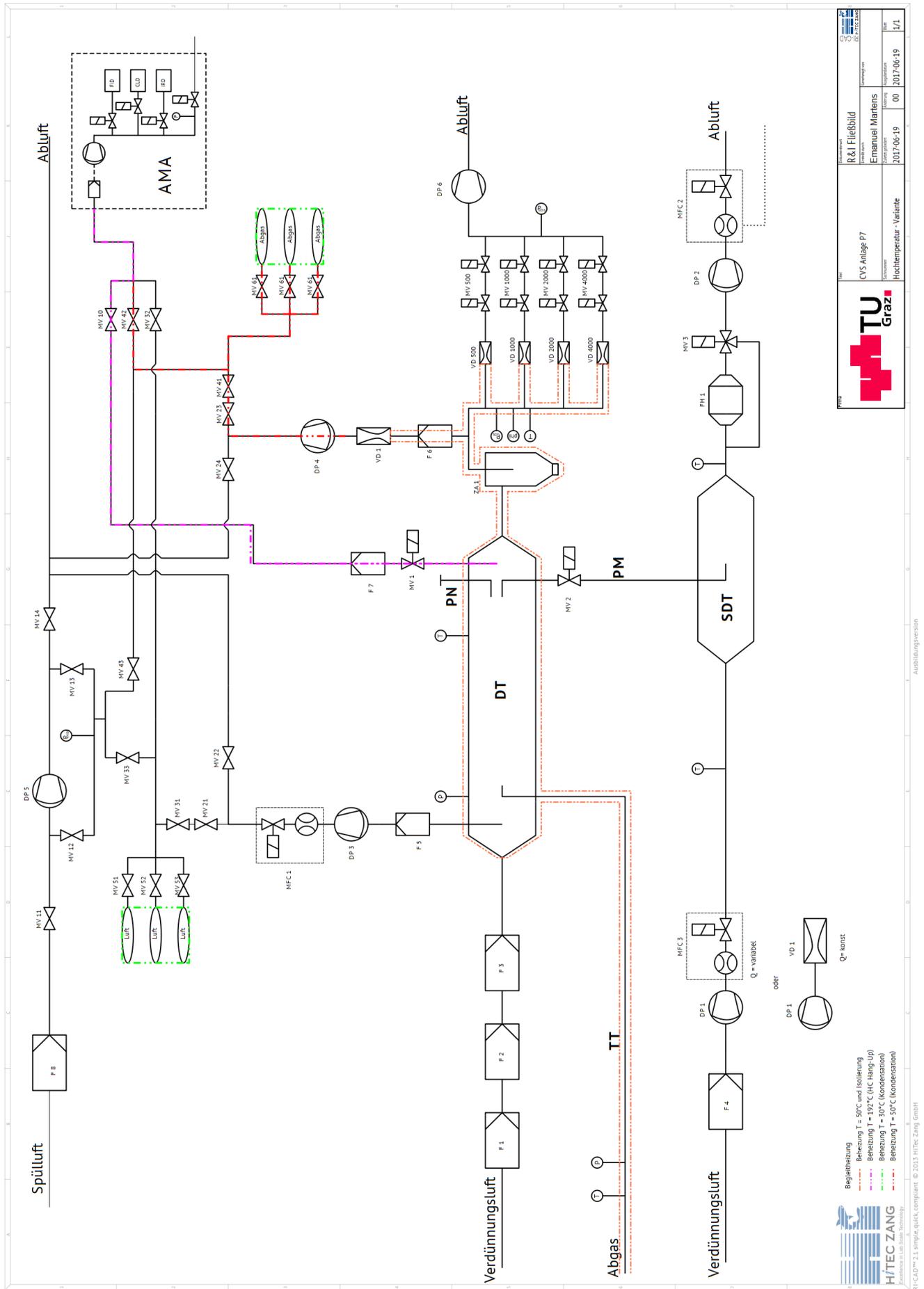
Für die Messung der Partikelmasse (PM) wurde ein sekundärer Verdünnungstunnel vorgesehen, um die in Kapitel 2.5 „Probenahmesystem für Partikelmasse (PM)“ geforderte Temperatur des verdünnten Abgases von $T < 52^{\circ}\text{C}$ vor dem Filterhalter einzuhalten.

Offene Anlage

Die Abbildung 5-4 zeigt ein Schema für eine offene CVS Anlage. Wie man sehen kann entfallen die Verdünnungsluftfilter und das verdünnte Abgas gelangt direkt in den Verdünnungstunnel, der seitens der Partikelmassenmessung gefordert ist. Der Verdünnungstunnel kann in dieser Anordnung kürzer ausgeführt werden, da sich die Mischstelle direkt am Auspuffende befindet. Ein großer Vorteil der offenen CVS-Anlage ist die einfache Anbindung an die Testfahrzeuge.

Kombianlage

In Abbildung 5-5 wurde eine Kombi-Anlage skizziert. Mit dieser kann wahlweise offen oder geschlossen gemessen werden. Um die Strömungswege für Messungen ohne PM möglichst kurz zu halten, wurde ein Anschluss vorgesehen, um den Verdünnungstunnel zu umgehen. Zusätzlich wurde dazu auch eine zweite Entnahmesonde für die modale Messung vorgesehen. Für die Verwendung des DT zusammen mit einer offenen Anlage, wurde ein zusätzliches Absperrventil in die Verdünnungsluftleitung integriert. Damit ließe sich auch mit dem offenen System eine PM-Messung durchführen. Der große Vorteil des einfachen Fahrzeuganschlusses und -wechsels für schnelle Messungen bleibt erhalten. Zusätzliche Absperrventile sorgen für ein dichtes Absperrn der Leitungsabschnitte der nicht benutzen Variante.



		Titel: R & I Fließbild Erstellt von: Emanuel Marénts Datum projekt: 2017-06-19 Edition: 00 Datum: 2017-06-19 Blatt: 1/1
CVS Anlage P7 Hochtemperatur - Variante		Gezeichnet von:

Begleitheizung
 - - - - - Beheizung T = 50°C und Isolierung
 - - - - - Beheizung T = 192°C (HC Hang-Up)
 - - - - - Beheizung T = 30°C (Kondensator)
 - - - - - Beheizung T = 50°C (Kondensator)

Q = variabel
 oder
 Q = konstant

Abbildung 5-2: Schema für eine geschlossene CVS Anlage mit Hochtemperatur Variante

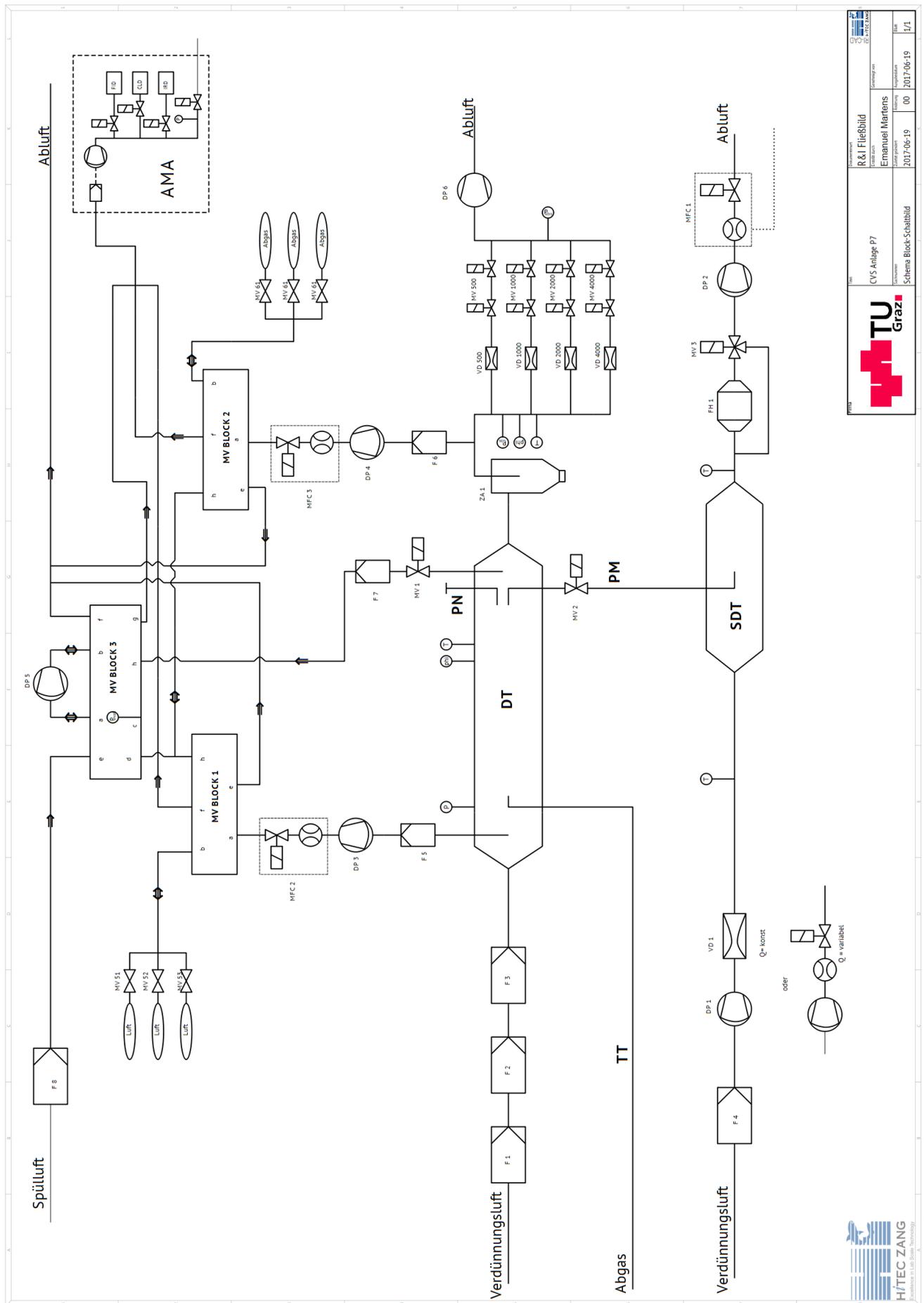


Abbildung 5-3: geschlossene CVS Anlage als Schlauchplan mit Magnetventilblöcken

TU Graz

CVS Anlage P7

R & I Fließbild

Emmanuel Merrens

Schematische Darstellung

2007-06-19

00

2007-06-19

1/1

H/TEC ZANG

Exhaustors in Lab. from Technology

RT-CAD™ 2.1 simple, quick, compliant. © 2013 H/TEC Zang GmbH

Ausbildungsversion

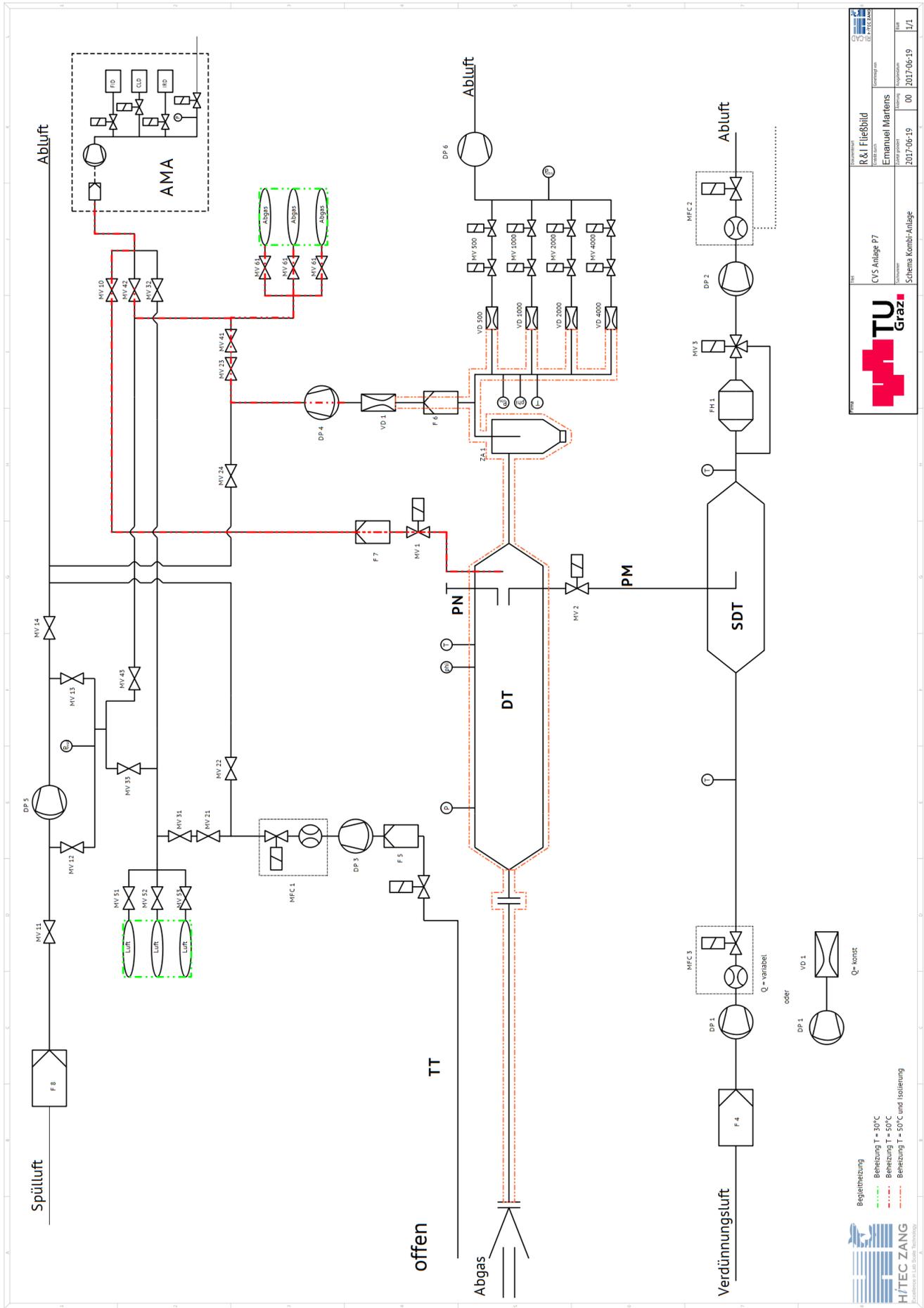


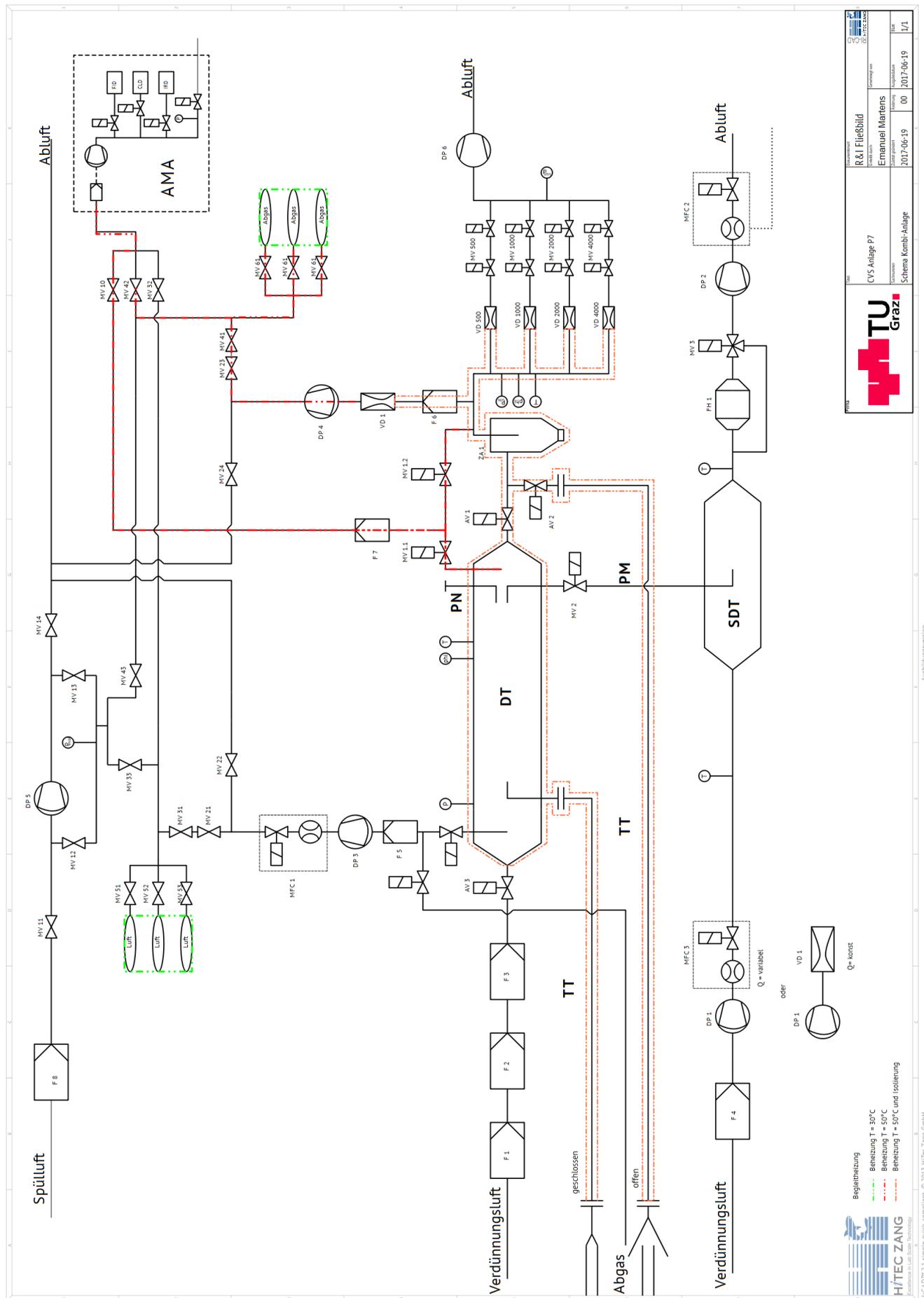
Abbildung 5-4: Schema für eine offene CVS-Anlage



H/TEC ZANG
Innovations in Lab. Rooms Technology

Titel	CVS Anlage P7	Gezeichnet von	R & I Fließbild
Prozess	Schematische Kombi-Anlage	Geprüft von	Emmanuel Martens
Datum	2017-06-19	Geprüft am	2017-06-19
Blatt	00	Blattzahl	1/1

Bild: CAD™ 2.1 Simple, quick, compliant. © 2013 H/TEC Zang GmbH
Abbildungsversion



Logo	TU Graz
Titel	CVS Anlage P7
Erstellt von	R&I Fließbild
Geprüft von	Emmanuel Martens
Gezeichnet	Schema Kombi-Anlage
Datum	2017-06-19
Blatt	1/1

H/TEC ZANG

Division of Lab. Based Technology

Begleitheizung
 - - - - - Beheizung T = 30°C
 - - - - - Beheizung T = 50°C
 - - - - - Beheizung T = 50°C und Isolierung

Q = variabel
 Q = konstant

RT-CAD™ 2.1 Jumper, quick, complete © 2013 H/TEC ZANG GmbH Ausbildungsversion

Abbildung 5-5: Schema für eine CVS Kombi-Anlage

Tabelle 5-1: Referenzliste für das geschlossene Schema

Zeichen	Bezeichnung	Zeichen	Bezeichnung
Pumpen		Block 1	Verdünnungsluft
DP1	Membranpumpe Sekundärluft	MV 21	Pumpe 3 - Beutel
DP2	Membranpumpe PM	MV 22	Pumpe 3- Abluft
DP3	Membranpumpe Verdünnungsluft	MV 31	Pumpe 3- Beutel
DP4	Membranpumpe Abgas	MV 32	Beutel - Analyse
DP5	Membranpumpe Spülen	MV 33	Beutel - Spülen & Evak
DP6	Vakuumpumpe - CVS	Block 2	Abgas
Filter		MV 23	Pumpe 4 - Beutel
F1	Aktivkohlefilter	MV 24	Pumpe 4 - Abluft
F2	Grobpartikelfilter	MV 41	Pumpe 4 - Beutel
F3	HEPA Filter	MV 42	Beutel - Analyse
F4	Filter Sekundärluft	MV 43	Beutel - Spülen & Evak
F5	Messgasfilter Verünnungsluft	Block 3	Spülen & Evak & modal
F6	Messgasfilter Beutelprobe	MV10	Sonde - Analyse
F7	Messgasfilter modale Messung	MV 11	Spülen
F8	Aktivkohlefilter Spülluft	MV 12	Evak
FH 1	Filterhalter PM	MV 13	Spülen
Durchflussmesser, -regler		MV 14	Evak
MFC 1	Verdünnungsluft Durchflussregler		
MFC 2	PM Durchflussregler	Zyklonabscheider	
MFC 3	Durchflussregler Sekundärluft	ZA1	Zyklonabscheider
Düsengalerie/ Venturi-Matrix			
MV 500	Absperrventil	Absperrventil	
MV 1000	Absperrventil	AV 1	Absperrventil geschl. Anlage
MV 2000	Absperrventil	AV 2	Absperrventil offene Anlage
MV 4000	Absperrventil		
VD 500	Venturidüse 500 l_N/min		
VD 1000	Venturidüse 1000 l_N/min		
VD 2000	Venturidüse 2000 l_N/min		
VD 4000	Venturidüse 3000 l_N/min		
VD 1	Proben-Venturidüse		
Magnetventile			
MV 1	Absperrventil modale Leitung		
MV 1.1	Absperrventil modale Leitung (offen)		
MV 1.2	Absperrventil modale Leitung (geschl.)		
MV 2	Absperrventil PM Leitung		
MV 3	Bypass PM Filterhalter		
MV 51	Magnetventil Luftbeutel 1		
MV 52	Magnetventil Luftbeutel 2		
MV 53	Magnetventil Luftbeutel 3		
MV 61	Magnetventil Abgasbeutel 1		
MV 62	Magnetventil Abgasbeutel 2		
MV 63	Magnetventil Abgasbeutel 3		

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen der bestehenden CVS-Anlage haben gezeigt, dass bei starker Temperaturzunahme des verdünnten Abgases die Anlage zum einen in ihrer Art und Weise der Probenahme an die Grenzen der vom Gesetzgeber gemachten Vorschriften hinsichtlich der Proportionalitätsabweichung gelangt, zum anderen zu erhöhten Dursatzschwankungen neigt. Des Weiteren konnte gelegentlich, unter extremen Bedingungen, Kondensatbildung in den Probenahmeleitungen beobachtet werden. Dies, sowie die hinzugekommene PM Messung, erfordern in naher Zukunft eine Erweiterung und Modernisierung der Anlage. Hinsichtlich der Entwicklung der Emissionsregulierung bei PKWs und dem hohen Partikel-Emissionsniveau bei Zweirädern, ist eine Reglementierung der Partikelanzahl in Zukunft denkbar. Aus diesem Grund wurde eine zusätzliche Entnahmestelle im Verdünnungstunnel der CVS-Anlage vorgesehen.

Die Detektionslimits, Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit heutiger Analysatoren stellen für die Euro 4 und Euro 5 Grenzwerte kein Problem dar. Um die Messfehler dennoch gering zu halten bedarf es einer Anpassung des Messbereichs. Ein weitaus größeres Problem stellen, aufgrund der sinkenden Emissionen, die sich immer weiter angleichenden Beutelkonzentrationen dar. Um daraus resultierende Messfehler, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, möglichst gering zu halten, sollte das Bestreben daher sein, die Konzentrationen in den Abgasbeutel so hoch wie möglich zu halten. Dies kann durch einen geringeren Verdünnungsgrad, Beheizen der Leitungen sowie einer Verdünnungsluft-Konditionierung realisiert werden. Das setzt wiederum eine geschlossene CVS-Anlage voraus. Auch für die bereits geforderte PM Messung ab Euro 4 für Dieselfahrzeuge und ab Euro 5 auch für DI-Motoren (direkt injection), sowie für die in Zukunft denkbare PN Messung wird eine geschlossene Anlage empfohlen. Das JRC als „in-house science service“ der EU Kommission führt alle Untersuchungen an geschlossenen CVS Anlagen durch, womit deren Berichte und Empfehlungen auf Messergebnissen einer geschlossenen CVS Anlage beruhen.

Dementgegen steht die offene CVS-Anlage, die dem tatsächlichen Betrieb am nächsten kommt. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zum Einfluss einer geschlossenen bzw. offenen CVS-Anlage auf das Emissionsverhalten eines Zweiradfahrzeuges mit Zweitaktmotor durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der erzeugte Unterdruck der geschlossenen Anlage in Schub- und Leerlaufphasen einen deutlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten von Zweitaktmotoren hat. Wie zu erwarten, konnte auch eine deutliche Beeinflussung des Sekundärlufsystems beobachtet werden. Genaueres kann Kapitell 3.7 entnommen werden. Jedoch haben sich mit den Untersuchungen und den dabei auftretenden Phänomenen weitere Fragen aufgetan, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt werden konnten. Deshalb besteht der Bedarf auf weitere Messungen, zwischen offener und geschlossener CVS-Anlage, zum Verständnis der genau ablaufenden Phänomene und hinsichtlich der Beeinflussung von 4-Taktmotoren.

Andere Messmethoden wie z.B. SMART SAMPLER, der auf einer Teilstromverdünnung des Abgases zur PM Messung basiert, sind für PKW und LKW bereist zulässig, aufgrund der Forderung einer Vollstromverdünnung bei Motorrädern jedoch noch nicht. Eine Änderung der Verordnung ist vom jetzigen Standpunkt aus nicht ersichtlich, würde den System- und Kostenaufwand aber deutlich verringern. Jedoch kann der SMART SAMPLER beispielsweise in den Verdünnungstunnel eingebunden und als PM Messsystem verwendet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Code of Federal Regulations, Protection of Environment, Title 40, Chapter 1, Subchapter C, Part 86, Subpart F; "Emission Regulations for 1978 and Later New Motorcycles; Test Procedures" [online]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=e77e7e6da5a2862ddece7dd3a3beb546&mc=true&node=pt40.21.86&rgn=div5> [Accessed 06.10.2017]
- [2] Europäische Kommission, „Delegierte Verordnung (EU) Nr. 134/2014“, vom 16. Dezember 2013
- [3] Merker, G.; Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren, Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. 7.Auflage, Springer Vieweg
- [4] Giechaskiel, B., Zardini, A., and Martini, G., "Particle Emission Measurements from L-Category Vehicles," SAE Int. J.Engines 8(5):2015, doi:10.4271/2015-24-2512
- [5] Das Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, „Verordnung (EU) 2016/1628 des europäischen Parlaments und des Rates“ vom 14. September 2016
- [6] Das Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, „Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des europäischen Parlaments und des Rates“, vom 15. Januar 2013
- [7] Zardini A., Clairotte M., Lanappe G., Giechaskiel B., Martini G. (2016), Preparatory work for the Environmental Effect Study on the Euro 5 step of L-category vehicles; EUR 27788 EN ; doi:10.2790/777240
- [8] Clairotte, M., Zardini, A., Martini, G. (2016); Phase 1 of the Environmental Effect Study on the Euro 5 step of L-category vehicles – Stocktaking and data mining; EUR 27994 EN; doi: 10.2790/008963
- [9] Das Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, „Richtlinie 2004/26/EG des europäischen Parlamentes und des Rates zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG“ vom 21.April 2004
- [10] Inoue K., Hirai H. and Adachi M. „Advanced Mass Emission Measurement Systems for Low Emission Vehicles“, SAE Paper 2001-26-0008, 2001
- [11] M. Krenn, F. Kampelmühler, C. Weidinger, G. Mariani; Design Impacts on CVS-Systems Meeting Future Requirements for Equivalent Zero Emissions Vehicles; F2000H251; AVL LIST GmbH, 2000
- [12] Gifhorn, A.; Tieb, H.; Wiebrecht, J.; Bollik R.: Grundsätzliche Untersuchungen zur Nutzung der CVS-Meßtechnik für niedrigemittierende Fahrzeuge mit Ottomotoren. MTZ 61 (2000), S.106 - 115
- [13] Behrendt H., Mörsch O., Seiferth C.T., Seifert G.E., Wiebrecht J.W., Studies on Enhanced CVS Technology to Achieve SULEV Certification, ISSN 0148-7191, Michigan 2002

-
- [14] Code of Federal Regulations, Protection of Environment, Title 40, Chapter 1, Subchapter U, Part 1065, “Engine-Testing Procedures” [online]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=2dbaa128bcd704af36a9c15b10b10d56&mc=true&node=pt40.37.1065&rgn=div5> [Accessed 06.10.2017]
- [15] Code of Federal Regulations, Protection of Environment, Title 40, Chapter 1, Subchapter U, Part 90, “Control of Emissions from Nonroad Spark-Ignition Engines at or below 19 kilowatts” [online]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=d74513366e842f5822468865e2d315f7&mc=true&node=pt40.22.90&rgn=div5> [Accessed 06.10.2017]
- [16] Knapp H., „Konstruktion und Aufbau einer CVS-Anlage“, Diplomarbeit, TU Graz 1990
- [17] AVL AMA i60, User’s Guide Gerätebeschreibung der Abgasmessanlage, Oktober 2008, AT25190, Rev. 02
- [18] Czerwinski, J., Comte, P., Mayer, A., Reutimann, F., „Investigations of Changes of the 2-Stroke Scooters Nanoparticles in the Exhaust- and CVS System,” SAE Technical Paper 2013-24-0178, 2013, doi:10.4271/2013-24-0178
- [19] Code of Federal Regulations, Protection of Environment, Title 40, Chapter 1, Subchapter U, Part 1054, “Control of Emissions from small Nonroad Spark-Ignition Engines and Equipment” [online]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=2dbaa128bcd704af36a9c15b10b10d56&mc=true&node=pt40.36.1054&rgn=div5> [Accessed 06.10.2017]
- [20] Konstantin W., „Weiterentwicklung der Auswertemethodik modaler Emissionsdaten einer CVS-Anlage“, Diplomarbeit, TU Graz 2015
- [21] Code of Federal Regulations, Protection of Environment, Title 40, Chapter 1, Subchapter U, Part 1066 “Vehicle-Testing Procedures” [online]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=2dbaa128bcd704af36a9c15b10b10d56&mc=true&node=pt40.37.1066&rgn=div5> [Accessed 06.10.2017]
- [22] Tromayer J., Neumann G., Kirchberger R., Eichelseder H., „A demonstration of the emission behaviour of 50 cm³ mopeds in Europe including unregulated components and particulate matter”, SAE 2011-32-0572, Graz 2011
- [23] „Delphi – 2016/2017 Worldwide Emissions Standards Heavy Duty and Off-Highway Vehicles“ [Online]. Available: <https://www.delphi.com/docs/default-source/worldwide-emissions-standards/2016-2017-heavy-duty-amp-off-highway-vehicles.pdf?status=Temp&sfvrsn=0.03636262961639791> [Accessed 01.09.2017]
- [24] „TetraTec Instruments, Bedienungsanleitung Düsengalerie SNG-50“ [online]. Available: http://www.tetrattec.de/fileadmin/users/downloads/DE/6_Kalibratoren/60_Durchfluss-Kalibratoren/SNG-50_man_d.pdf [Accessed 04.09.2017]
- [25] „Lambda Calculation – The Modified Brettschneider Equation – Corrected for Gasoline NDIR Measurement” [online]. Available: http://www.bridgeanalyzers.com/wp-content/uploads/2016/07/01A_Modified-Lambda-Brettschneider.pdf [Accessed 22.09.2017]
- [26] Joint Research Centre JRC, private Kommunikation

- [27] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Regelung Nr. 83 „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Emission von Schadstoffen aus dem Motor entsprechend den Kraftstoffanforderungen des Motors [2015/1038]“ [online]. Available: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42015X0703\(01\)&from=DE](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42015X0703(01)&from=DE) [Accessed 06.10.2017]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Fuhrpark an Zweiradfahrzeugen der EU28 Staaten in 2014 (Legendenskala in Millionen Fahrzeugen) [8]	1
Abbildung 2-1: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für ein Motorräder der Klasse L3e mit $H \geq 150\text{ccm}$ und $v \geq 130\text{ km/h}$	3
Abbildung 2-2: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für einen Roller der Klasse L1e-B	4
Abbildung 2-3: THC+NO _x Typ1 Testwerte für L1e PI Fahrzeuge[8].....	6
Abbildung 2-4: CO Typ1 Testwerte für L1e PI Fahrzeuge[8]	6
Abbildung 2-5: CO Typ1 Testwerte für L3e Fahrzeuge (PI und PI Hybrid Modelle) [8]	7
Abbildung 2-6: THC Typ1 Testwerte für L3e Fahrzeuge (PI und PI Hybrid Modelle) [8].....	7
Abbildung 2-7: NO _x Typ1 Testwerte für L3e Fahrzeuge (PI und PI Hybrid Modelle) [8].....	8
Abbildung 2-8: Verdünnungssystem mit Verdrängerpumpe nach EU 134/2014 [2].....	14
Abbildung 2-9: Verdünnungssystem mit Verdrängerpumpe nach US-EPA-CFR-40-part86 [1]..	15
Abbildung 2-10: Verdünnungssystem mit kritisch durchströmtem Venturirohr [2].....	16
Abbildung 2-11: Vollstrom Verdünnungssystem [9]	18
Abbildung 2-12: Offenes Verdünnungssystem [2]	19
Abbildung 2-13: Mögliche Probeentnahmestellen zur Bestimmung gasförmiger Emissionen [3]	22
Abbildung 2-14: Probenahmesystem für gasförmige Emissionen nach EPA-40-CFR-Part90 Non-Road SI < 19kW [15]	24
Abbildung 2-15: Probenahme-System [2].....	30
Abbildung 2-16: Ausführung der Partikel-Probenahmesonde [2].....	32
Abbildung 2-17: Sekundärverdünnungstunnel für die PM Messung [9]	33
Abbildung 2-18: Versuchsaufbau [4]	36
Abbildung 2-19: Schematische Darstellung des empfohlenen Partikel-Probenahmesystems für PKWs [27]	37
Abbildung 2-20: Vergleich von Messungen am Verdünnungstunnel (CVS) und Auspuffende (TP) (L3e-A1 #1) während eines Test mit konstanter Geschwindigkeit. [4]	37
Abbildung 2-21: Korrelation der verschiedenen Prüfzyklen für Partikel > 23nm [4]	38
Abbildung 3-1: Prinzipschaltbild der CVS-Anlage auf dem P7 [16].....	42
Abbildung 3-2: Übersichtsplan 1 [16].....	43
Abbildung 3-3: Schlauchplan der CVS-Anlage [16]	44
Abbildung 3-4: Kalibriergerade; Δp =Differenzdruck über Gebläse; p_{abs} = Absolutdruck am Gebläseauspuffstutzen [16].....	45
Abbildung 3-5: Temperaturverlauf vor PDP und Drehzahlverlauf der PDP bei einem WMTC 3-2 Zyklus mit einer BMW F800	47
Abbildung 3-6: Temperatur- und CVS-Durchflussverlauf über einen WMTC 3-2 Zyklus mit einer BMW F800	48
Abbildung 3-7: Wirkungsweise Massenstrommesser und Regelgerät Brooks 5850 Tr [16].....	49
Abbildung 3-8: Schwebekörper-Volumenstrommesser und Regler Brooks SHO-RATE 1355G .	50
Abbildung 3-9: AVL AMA i60 [17]	51

Abbildung 3-10: GPU einer AVL AMA i60 [17]	52
Abbildung 3-11: Fließplan für verdünntes Abgas; 1=Messgas; 2=Nullgas/Kalgas; 3=Absaugung [17].....	53
Abbildung 3-12: Fließplan für SULEV-Option [17].....	54
Abbildung 3-13: Zusammensetzung des statistischen Gesamtfehlers ($\Delta m_{HC_e} = \pm 1,3 \text{ mg/mi} = 100\%$) bei gewichteter Emissionsmasse von 6 mg/mi bei FTP75 [13]	56
Abbildung 3-14: Einfluss des Konzentrationsverhältnisses auf die Ergebnisqualität [11]	57
Abbildung 3-15: WMTC 2 und WMTC 3 inklusive reduzierter Höchstgeschwindigkeiten [4]....	58
Abbildung 3-16: Flussbild für Kondensationsberechnung.....	59
Abbildung 3-17: Temperatur, um Wasserkondensation in den verdünnten Abgasleitungen und Beuteln zu verhindern, als Funktion von DF [13]	61
Abbildung 3-18: „Out-gassing“ von Tedlar Beuteln bei verschiedenen Temperaturen (gefüllt mit synthetischer Luft)[13].....	62
Abbildung 3-19: Benötigter DF für eine relative Feuchte im Beutel von $\varphi=80\%$, bei $T_{\text{Luft}}=24^\circ\text{C}$ und $p_{\text{Luft}}=980 \text{ mbar}$	62
Abbildung 3-20: Benötigte Abgas-Temperatur für eine relative Feuchte der verdünnten Abgase von $\varphi=80\%$ bei $T_{\text{Luft}}=24^\circ\text{C}$, $p_{\text{Luft}}=980 \text{ mbar}$ und $\varphi_{\text{Luft}}=50\%$	63
Abbildung 3-21: Schaubild einer geschlossenen CVS-Anlage [7]	65
Abbildung 3-22: Vorhandener Verdünnungstunnel (DT)	65
Abbildung 3-23: DT Umbau für geschlossene CVS	66
Abbildung 3-24: Auspuffadaptierung	67
Abbildung 3-25: Versuchsaufbau für geschlossene CVS Messung	68
Abbildung 3-26: Mittlerer Druckverlauf beim Stripdown-Versuch (CVS_Messung_2017_07_06_0001).....	69
Abbildung 3-27: Realer Druckverlauf beim Stripdown-Versuch (CVS_Messung_2017_07_06_0001).....	70
Abbildung 3-28: Frequenzanalyse des Drucksignals zum Zeitpunkt 207 s (CVS_Messung_2017_07_06_0001).....	70
Abbildung 3-29: Frequenzanalyse des Drucksignals zur Niveaubestimmung (CVS_Messung_2017_07_06_0002).....	71
Abbildung 3-30: Frequenzanalyse des Drucksignals bei offener CVS Anlage und nicht gestartetem Motor (CVS_Messung_2017_06_27_0001)	72
Abbildung 3-31: Mittlere Druckdifferenz für ECE R47 Zyklus (CVS_Messung_2017_07_06_0003 und CVS_Messung_2017_07_06_0006).....	73
Abbildung 3-32: Mittlere Druckdifferenz für ECE R47 Zyklus Phase1 (CVS_Messung_2017_07_07_0001 und CVS_Messung_2017_07_07_0003).....	73
Abbildung 3-33: Vergleich der Schwankungsamplituden zwischen offen und geschlossen für den 1.Teil des ECE R47 Testzyklus (CVS_Messung_2017_07_07_0001 und CVS_Messung_2017_07_07_0003).....	74
Abbildung 3-34: Druckverlauf aufgezeichnet mit Absolutdrucksensor.....	75
Abbildung 3-35: Gemittelte Beutelemissionen des 2. Zyklusteils	76
Abbildung 3-36: Gemittelte CO2 Beutel-Emissionen des 2.Zyklusteils.....	77

Abbildung 3-37: Gemittelte modale HC-Emissionen	78
Abbildung 3-38: Gemittelte modale HC-Emissionen (Zyklus 6 und 7).....	78
Abbildung 3-39: Gemittelte modale NOx Emissionen (Zyklus 6 und 7).....	79
Abbildung 3-40: Gemittelte modale CO Emissionen (Zyklus 6 und 7).....	80
Abbildung 3-41: Modale AMA CO-Emissionen mit und ohne Sekundärluftsystem.....	81
Abbildung 3-42: Gemittelte CO-Rohemissionen (Zyklus 6 und 7)	81
Abbildung 3-43: Globaler Lambda(Brettschneider)-Verlauf vor Kat (Zyklus 6 und 7)	82
Abbildung 3-44: Gemittelte HC-Rohemissionen (Zyklus 6 und 7)	83
Abbildung 3-45: Gemittelte O2-Konzentration im Rohabgas (Zyklus 6 und 7).....	83
Abbildung 3-46: Frequenzanalyse des Drucksignals bei konstanter Fahrt mit 20 km/h, CVS- Anlage geschlossen mit 2,5mbar Unterdruck	84
Abbildung 3-47: Frequenzanalyse des Drucksignals bei konstanter Fahrt mit 20 km/h, CVS- Anlage offen.....	85
Abbildung 3-48: Frequenzanalyse des Drucksignals im Leerlauf bei geschlossener CVS (2,5mbar)	86
Abbildung 3-49: Frequenzanalyse des Drucksignals im Leerlauf bei offener CVS	86
Abbildung 3-50: Gemittelte modale CO2 Emissionen (Zyklus 6 und 7)	87
Abbildung 3-51: Gemittelte CO2-Rohemissionen (Zyklus 6 und 7)	87
Abbildung 3-52: Gemittelte Abgastemperatur nach Katalysator	88
Abbildung 3-53: Verbrauchssteigerung errechnet aus CO2 Emissionen	89
Abbildung 3-54: Totzeit Unterschied bei offener und geschlossener Anlage für CO Emissionen	90
Abbildung 3-55: Totzeit Unterschied bei offener und geschlossener Anlage für HC Emissionen	90
Abbildung 3-56: Totzeit Unterschied bei offener und geschlossener Anlage für NOx Emissionen	91
Abbildung 4-1: Durchschnittlicher Abgasvolumenstrom unterschiedlicher Fahrzeuge in den 3 Phasen des WMTC 3-2	94
Abbildung 4-2: Fahrzeugleistung und Abgasstrom über Drehzahl für verschiedene Testzyklen. Testfahrzeug H=900 ccm, P=100 kW, v_max > 150 km/h [7].....	95
Abbildung 4-3: Beispiel einer Düsengalerie [24].....	97
Abbildung 4-4: Block & Bleedverfahren zur Dichtheitskontrolle [24].....	100
Abbildung 5-1: Schema für eine geschlossene CVS Anlage	103
Abbildung 5-2: Schema für eine geschlossene CVS Anlage mit Hochtemperatur Variante	104
Abbildung 5-3: geschlossene CVS Anlage als Schlauchplan mit Magnetventilblöcken	105
Abbildung 5-4: Schema für eine offene CVS-Anlage.....	106
Abbildung 5-5: Schema für eine CVS Kombi-Anlage.....	107
Abbildung 0-1: NRSC Prüfzyklen für NRSh und NRS Motoren [23].....	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Zutreffende Regulierungen und Verordnungen	2
Tabelle 2-2: Fahrzeugtypen und Unterklassen nach Verordnung (EU) Nr. 168/2013 [4]	5
Tabelle 2-3: Zusammenfassung der momentanen Typ1 Testwerte für Kategorie L-Fahrzeuge [8]	8
Tabelle 2-4: Gewichtungsfaktoren für Euro 4(links) und Euro 5(rechts) [6].....	9
Tabelle 2-5: Unterklassen der „Non-Road“ Motorklassen NRSh und NRS [5]	10
Tabelle 2-6: Emissionsgrenzwerte für die Klassen NRSh und NRS[5]	10
Tabelle 2-7: CVS offen vs. geschlossen.....	20
Tabelle 2-8: § 1054.1 – Part 1054 Applicability by Model Year [19]	25
Tabelle 2-9: Geeignete Materialien für Gasbeutel und Leitungen [14]	27
Tabelle 2-10: Chronologie der PN-Verordnungen [7]	35
Tabelle 2-11: Verhältnis zwischen dem PN Level gemessener Kategorie-L Fahrzeuge und dem PN Grenzwert für PKW, gemessen mit einem PMP konformen System [7].....	39
Tabelle 2-12: Minimale Frequenz für die Datenerfassung und die Regelung ([21]: §1066.125) ..	40
Tabelle 3-1: Analytoren der AMA i60 D1 für P7	51
Tabelle 3-2: Messgastemperaturen ([17]: S.57)	53
Tabelle 3-3: CO2 Anteile in [Vol%] bei $\lambda=1$ [2]	55
Tabelle 3-4: Testergebnisse aus Messung einer Ducati Monster (1198 ccm) vom 22.09.2016.....	59
Tabelle 3-5: Kondensationsrisiko in den Beuteln durchgeführter Messungen	60
Tabelle 3-6: Theoretisch minimaler durchschnittlicher Verdünnungsgrad.....	60
Tabelle 3-7: Spezifikationen des Testfahrzeuges	67
Tabelle 3-8: Veränderung der Komponenten Konzentration in den Beuteln, bezogen auf die Konzentration im offenen System.....	77
Tabelle 4-1: Zutreffende Richtlinien und Verordnungen.....	92
Tabelle 4-2: CVS-Durchsatz Dimensionierung	93
Tabelle 4-3: Abgaswerte aus Messungen mit einem vergleichbaren Versuchsträger (Handheld). ..	95
Tabelle 4-4: Abschätzung Venturidüsen Halsdurchmesser.....	99
Tabelle 4-5: Fehler bei Vernachlässigung der relativen Feuchtem Messung.....	99
Tabelle 5-1: Referenzliste für das geschlossene Schema	108
Tabelle 0-1: Auspuffemissionen nach Kaltstart Euro 4 [6].....	117
Tabelle 0-2: Auspuffemissionen nach Kaltstart Euro 5 [6].....	118
Tabelle 0-3: Zeitplan für die Anwendung der Verordnung auf Typengenehmigung [6]	119
Tabelle 0-4: Zeitpunkte zur Anwendung von Verordnung 2016/1628 für NRSh und NRS Motoren [5].....	120
Tabelle 0-5: Prüfzyklen für NRSh und NRS Motoren [5]	121

Anhang

Anhang 1: Emissionsgrenzwerte und Zeitplan für L-Kategorie Fahrzeuge

Tabelle 0-1: Auspuffemissionen nach Kaltstart Euro 4 [6]

Fahrzeugklasse	Bezeichnung der Fahrzeugklasse	Antriebsklasse	Euronorm	Masse des Kohlenmonoxids (CO)	Masse der Kohlenwasserstoffe (THC)	Masse der Stickoxide (NO _x)	Partikelmasse (PM)	Prüfzyklus
				L ₁ (mg/km)	L ₂ (mg/km)	L ₃ (mg/km)	L ₄ (mg/km)	
L1e-A	Fahrräder mit Antriebssystem	PI/CI/Hybrid	Euro 4	560	100	70		ECE R47
L1e-B	Zweirädrige Kleinkrafträder	PI/CI/Hybrid	Euro 4	1 000	630	170	—	ECE R47
L2e	Dreirädrige Kleinkrafträder	PI/CI/Hybrid	Euro 4	1 900	730	170	—	ECE R47
L3e L4e (1)	— Zweirädrige Kraftträder mit und ohne Beiwagen	PI/PI Hybrid, v _{max} < 130 km/h	Euro 4	1 140	380	70	—	WMTC, Phase 2
L5e-A L7e-A	— Dreirädrige Kraftfahrzeuge — Schwere Straßen-Quads	PI/PI Hybrid, v _{max} ≥ 130 km/h	Euro 4	1 140	170	90	—	WMTC, Phase 2
		CI/CI Hybrid	Euro 4	1 000	100	300	80 (8)	WMTC, Phase 2
L5e-B	Dreirädrige Kraftfahrzeuge zur gewerblichen Nutzung	PI/PI Hybrid	Euro 4	2 000	550	250	—	ECE R40
		CI/CI Hybrid	Euro 4	1 000	100	550	80 (8)	ECE R40
L6e-A L6e-B	Leichte Straßen-Quads Leichte Vierradmobile	PI/PI Hybrid	Euro 4	1 900	730	170		ECE R47
		CI/CI Hybrid	Euro 4	1 000	100	550	80 (8)	ECE R47
L7e-B L7e-C	Schwere Gelände-Quads Schwere Vierradmobile	PI/PI Hybrid	Euro 4	2 000	550	250	—	ECE R40
		CI/CI Hybrid	Euro 4	1 000	100	550	80 (8)	ECE R40

(8) nur für CI, auch als Teil eines Hybridantriebes

Tabelle 0-2: Auspuffemissionen nach Kaltstart Euro 5 [6]

Fahrzeug klasse	Bezeichnung der Fahrzeugklasse	Antriebsklasse	Euro-Norm ⁽⁴⁾	Masse des Kohlenmonoxids (CO)	Masse der Kohlenwasserstoffe (THC)	Masse der Nichtmethankohlenwasserstoffe (NMHC)	Masse der Stickoxide (NO _x)	Partikelmasse (PM)	Prüfzyklus
				L ₁ (mg/km)	L _{2A} (mg/km)	L _{2B} (mg/km)	L ₃ (mg/km)	L ₄ (mg/km)	
L1e-A	Fahrräder mit Antriebssystem	Pf/CI/Hybrid	Euro 5	500	100	68	60	4,5 ⁽⁹⁾	Überarbeiteter WMTC ⁽¹⁰⁾
L1e-B-L7e	Alle sonstigen Fahrzeuge der Klasse L	Pf/ Pf Hybrid	Euro 5	1 000	100	68	60	4,5 ⁽⁹⁾	Überarbeiteter WMTC
		CI/CI Hybrid		500	100	68	90	4,5	Überarbeiteter WMTC

(9) nur für Benziner mit DI

Tabelle 0-3: Zeitplan für die Anwendung der Verordnung auf Typengenehmigung [6]

Nummer	Bezeichnung	(Unter-)Klasse	Neue Fahrzeugtypen verbindlich	Bestehende Fahrzeugtypen verbindlich	Letztes Zulassungsdatum für übereinstimmende Fahrzeuge
1.	Anwendung des delegierten Rechtsakts auf die Leistungsanforderungen an Umweltverträglichkeit und Antriebsleistung; Punkte entsprechend Anhang II Teil A				
1.1.	Prüfung Typ I, Prüfung der Auspuffemissionen nach Kaltstart	—	—	—	—
1.1.1.	Prüfzyklus	—	—	—	—
1.1.1.1.	Prüfung Typ I: Prüfzyklus nach ECE R 47	L1e, L2e, L6e	1.1.2017	1.1.2018	31.12.2020
1.1.1.2.	Prüfung Typ I ECE R 40 (ggf. mit einem Außerorts- Fahrzyklus)	L5e-B, L7e-B, L7e-C	1.1.2016	1.1.2017	31.12.2020
1.1.1.3.	Prüfung Typ I, WMTC, Phase 2	L3e, L4e, L5e-A, L7e-A	1.1.2016	1.1.2017	31.12.2020
1.1.1.4.	Prüfung Typ I, überarbeiteter Prüfzyklus auf WMTC-Grundlage	L1e - L7e	1.1.2020	1.1.2021	
1.1.2.	Prüfung Typ I, Grenzwerte für die Auspuffemissionen		—	—	—
1.1.2.1.	Euro 4: Anhang VI Teil A1	L1e, L2e, L6e	1.1.2017	1.1.2018	31.12.2020
1.1.2.2.	Euro 4: Anhang VI Teil A1	L3e, L4e, L5e, L7e	1.1.2016	1.1.2017	31.12.2020
1.1.2.3.	Euro 5 Anhang VI Teil A2	L1e - L7e	1.1.2020	1.1.2021	
1.2.	Prüfung Typ II, Prüfung der Emissionen bei (erhöhter) Leerlaufdrehzahl/freier Beschleunigung				
1.2.1.	Prüfung Typ II, Prüfung der Emissionen bei (erhöhter) Leerlaufdrehzahl/freier Beschleunigung	L1e, L2e, L6e	1.1.2017	1.1.2018	
1.2.2.	Prüfung Typ II, Prüfung der Emissionen bei (erhöhter) Leerlaufdrehzahl/freier Beschleunigung	L3e, L4e, L5e, L7e	1.1.2016	1.1.2017	
1.3.	Prüfung Typ III, Null-Emission aus dem Kurbelgehäuse				

Anhang 2: Zeitplan und Prüfzyklen für Non-Road Maschinen

Tabelle 0-4: Zeitpunkte zur Anwendung von Verordnung 2016/1628 für NRSh und NRS Motoren [5]

Tabelle III-3: Zeitpunkte der Anwendung dieser Verordnung auf Motoren der Klasse NRSh

Klasse	Art der Zündung	Leistungsbereich (kW)	Unterklasse	Verbindliches Datum der Anwendung dieser Verordnung auf	
				die EU-Typgenehmigung von Motoren	das Inverkehrbringen von Motoren
NRSh	SI	0 < P < 19	NRSh-v-1a NRSh-v-1b	1. Januar 2018	1. Januar 2019

Tabelle III-4: Zeitpunkte der Anwendung dieser Verordnung auf Motoren der Klasse NRS

Klasse	Art der Zündung	Leistungsbereich (kW)	Unterklasse	Verbindliches Datum der Anwendung dieser Verordnung auf	
				die EU-Typgenehmigung von Motoren	das Inverkehrbringen von Motoren
NRS	SI	0 < P < 56	NRS-vr-1a NRS-vi-1a NRS-vr-1b NRS-vi-1b NRS-v-2a NRS-v-2b NRS-v-3	1. Januar 2018	1. Januar 2019

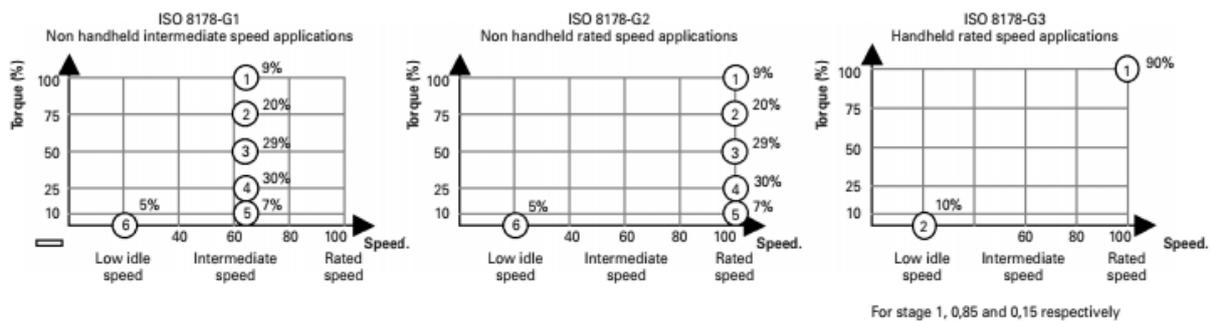
Tabelle 0-5: Prüfzyklen für NRSh und NRS Motoren [5]

Tabelle IV-3: NRSC-Prüfzyklen für Motoren der Klasse NRSh

Klasse	Drehzahl	Zweck	Unterklasse	NRSC
NRSh	variabel oder konstant	Motor mit einer Bezugsleistung von höchstens 19 kW für den Einsatz in handgehaltenen Maschinen	NRSh-v-1a NRSh-v-1b	G3

Tabelle IV-4: NRSC-Prüfzyklen für Motoren der Klasse NRS

Klasse	Drehzahl	Zweck	Unterklasse	NRSC
NRS	variabel < 3 600 min ⁻¹	Motor mit variabler Drehzahl und einer Bezugsleistung von höchstens 19 kW für Anwendungen mit einer Drehzahl von < 3 600 min ⁻¹	NRS-vi-1a NRS-vi-1b	G1
	variabel ≥ 3 600 min ⁻¹ ; oder konstant	Motor mit variabler Drehzahl und einer Bezugsleistung von höchstens 19 kW für Anwendungen mit einer Drehzahl von ≥ 3 600 min ⁻¹ ; Motor mit konstanter Drehzahl und einer Bezugsleistung von höchstens 19 kW	NRS-vr-1a NRS-vr-1b	G2
	variabel oder konstant	Motor mit einer Bezugsleistung zwischen 19 kW und 30 kW bei einem Gesamthubraum von weniger als 1 l	NRS-v-2a	G2
		Motor mit einer Bezugsleistung über 19 kW, jedoch nicht mit einer Bezugsleistung zwischen 19 kW und 30 kW bei einem Gesamthubraum von weniger als 1 l	NRS-v-2b NRS-v-3	C2



Intermediate speed is the maximum torque speed if it occurs between 60% and 75% of rated speed
or 60% of the rated speed if this is higher
or 75% of the rated speed if this is lower

Abbildung 0-1: NRSC Prüfzyklen für NRSh und NRS Motoren [23]

Anhang 3: Fehler ohne relative Feuchtemessung

Die erste Tabelle zeigt beispielhafte Kalibrierbedingungen (@KB) die bei der Kalibrierung an den Venturidüsen vorherrschen, sowie die voraussichtlichen Betriebsbedingungen (@BB) an den Düsen. Der Volumenstrom (Normvolumenstrom) der sich für reine Luft bei Betriebsbedingungen einstellt (Q_{Luft} @BB) wurde mit der Software ORI-FlowCal der Firma TetraTec Instruments berechnet, dazu wurde die relative Feuchte über den gleichbleibenden Feuchtegrad x berechnet. Für die Fehlerabschätzung wurde die relative Feuchte bei unterschiedlichen Verdünnungsfaktoren ermittelt und der sich daraus ergebende Volumenstrom Q_{tat} durch die Düse ebenfalls mit ORI-FlowCal berechnet. Die Rechnung wurde für die kleinste ($d=8,5\text{mm}$) Düse und die größte Düse ($d=24\text{mm}$) durchgeführt.

Die Abweichung errechnet sich wie folgt:

$$Abweichung = \frac{Q_{tat} - Q_{Luft}}{Q_{Luft}} * 100$$

	@KB		@BB
p [mbar]	950		950
T [°C]=	25		80
RH [%]=	50		3,295238436
p_d_satt [Pa]	3160,056916		47948,8547
x [kg_w/kg_trL]	0,01052000	=	0,01052
Ergebnis ORI-FLOW			
Düse 1 Q_{Luft} [l_N/min]	572,2772072		525,75683
Düse 4 Q_{Luft} [l_N/min]	4562,5		4191,637538

DF [-]	rel. Feuchte [%]	Q_{tat} [l_N/min]	Abweichung [%]
DÜSE 1 (8,5 mm)			
2	15,54	519,5705997	-1,177
6	7,31	523,7365659	-0,384
10	5,66	524,5678025	-0,226
20	4,43	525,1865956	-0,108
40	3,81	525,4982314	-0,049
DÜSE 4 (24 mm)			
2	15,54	4142,317332	-1,177
6	7,31	4175,530824	-0,384
10	5,66	4182,157923	-0,226
20	4,43	4187,0913	-0,108
40	3,81	4189,57584	-0,049

Anhang 4: Berechneter Druckverlust bei geschlossener CVS-Anlage.

Berechnet mit dem Druckverlustrechner von Software-Factory H. Schmitz.
(www.druckverlust.de)

Projekt:	1	2	3	4
1. Fördermedium				
Fördermedium	Luft	Luft	Luft	Luft
Aggreg.Zustand	gasförmig	gasförmig	gasförmig	gasförmig
Volumenstrom	270,8540833	270,8540833	270,8540833	270,8540833
Massenstrom	310,1279254	310,1279254	310,1279254	310,1279254
Volumenstrom abzw.Rohr				
Dichte	1,145	1,145	1,145	1,145
Dyn.-Viskos.	18,448	18,448	18,448	18,448
Kin.-Viskos.	16,11179039	16,11179039	16,11179039	16,11179039
2. Zusätzliche Daten für Gase				
Eintritts-Druck (abs.)	0,98	0,98	0,98	0,98
Eintritts-Temperatur	25	25	25	25
Austritts-Temperatur	25	25	25	25
Normvolumenstrom	240	240	240	240
3. Rohrleitungselement				
Rohrbezeichnung	Kreisrohr	Kreisrührer	Allmähliche Rohrerweiterung	Kreisring
Rohrleitungselement	1	2	1	1
Anzahl	1	2	1	1
Elementabmessungen	Rohrdurchmesser D: 100,00 mm Rohrlänge L: 3,00 m	Rohrdurchmesser D: 100,00 mm Radius R: 100,00 mm Winkel w: 90,00 Grad	Rohrdurchmesser D1: 100,00 mm Rohrdurchmesser D2: 200,00 mm Winkel w: 45,00 Grad	Rohrdurchmesser D: 200,00 mm Innendurchmesser Di: 60,00 mm Rohrlänge L: 0,20 m
SI				
4. Berechnungsergebnis				
Strömungsgeschw.	9,579503604	9,579503604	9,579503604	2,631731759
Reynolds-Zahl	59456,48106	59456,48106	59456,48106	22867,87733
Strömungsgeschw.2				
Reynolds-Zahl 2				
Strömungsform	turbulent	turbulent	turbulent	turbulent
Rohrrauigkeit	0,1	0,1	0,1	0,1
Rohrreibungszahl	0,023466962	0,023466962	0,023466962	0,026643532
Zeta-Wert	0,704008862	0,577414498	0,621260295	0,038062189
Zeta-Wert abzw.Rohr				
Druckv. abzw.Rohr	0,369931747	0,606801175	0,326443059	0,001509221
Druckverlust	0,000369932	0,000606801	0,000326443	1,50922E-06
Summe Druckverlust	0,000369932	0,000976733	0,001303176	0,001304685

Projekt:



1

1. Fördermedium

Fördermedium		Luft	
Aggreg.Zustand		gasförmig	
Volumenstrom	m3/h		270,8540833
Massenstrom	kg/h		310,1279254
Volumenstrom abzw.Rohr	m3/h		
Dichte	kg/m3		1,145
Dyn.Viskos.	10-6 kg/ms		18,448
Kin.Viskos.	10-6 m2/s		16,11179039

2. Zusätzliche Daten für Gase

Eintritts-Druck (abs.)	bar		0,98
Eintritts-Temperatur	°C		25
Austritts-Temperatur	°C		25
Normvolumenstrom	Nm3/h		240

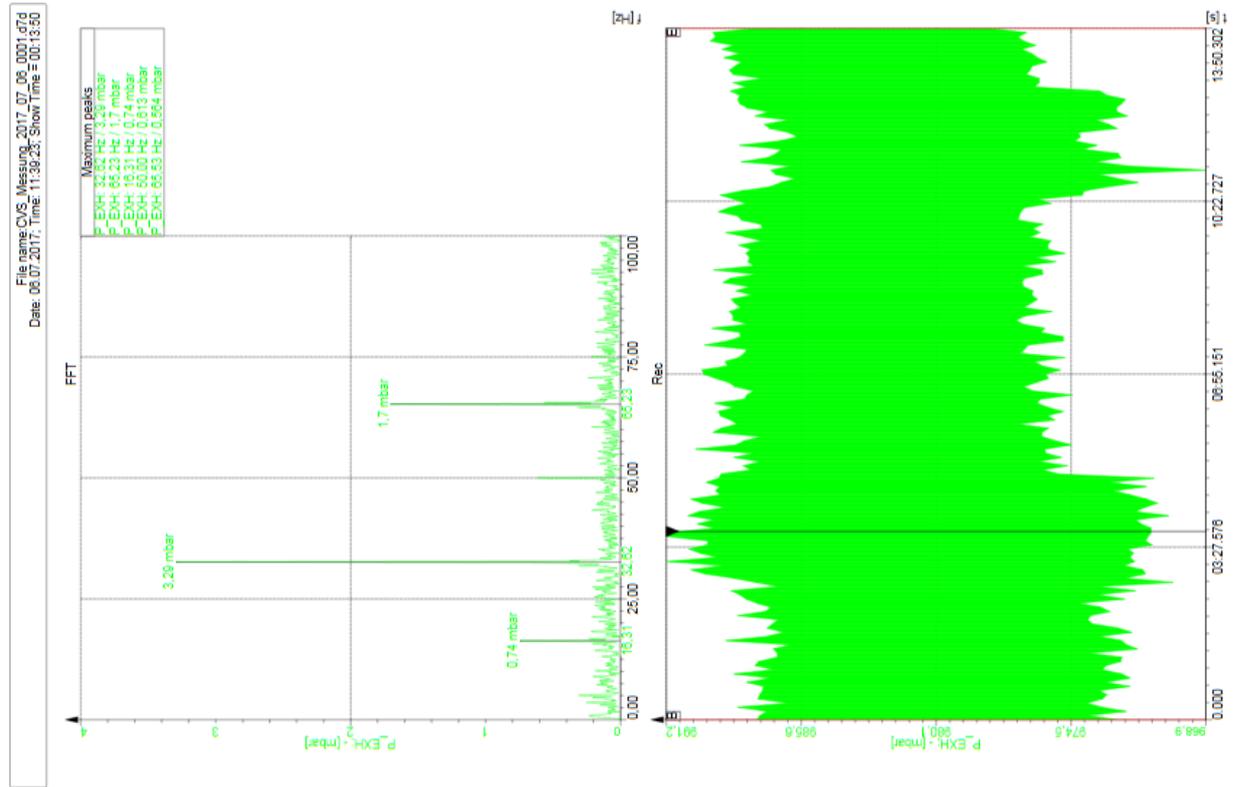
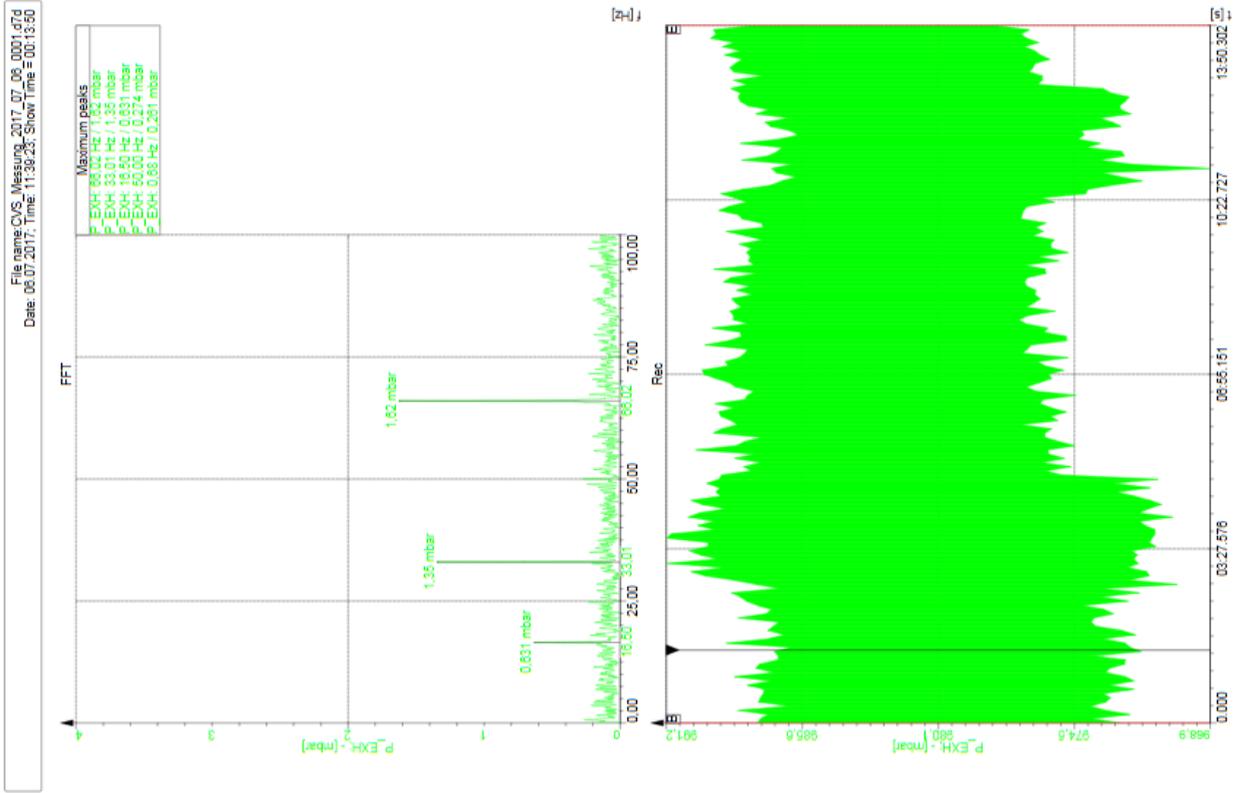
3. Rohrleitungselement

Rohrbezeichnung		Blende	
Rohrleitungselement		Lochscheibe	
Anzahl			1
Elementabmessungen	SI	Rohrdurchmesser D1: 200,00 mm Durchmesser D2: 80,00 mm Länge L: 10,00 mm	

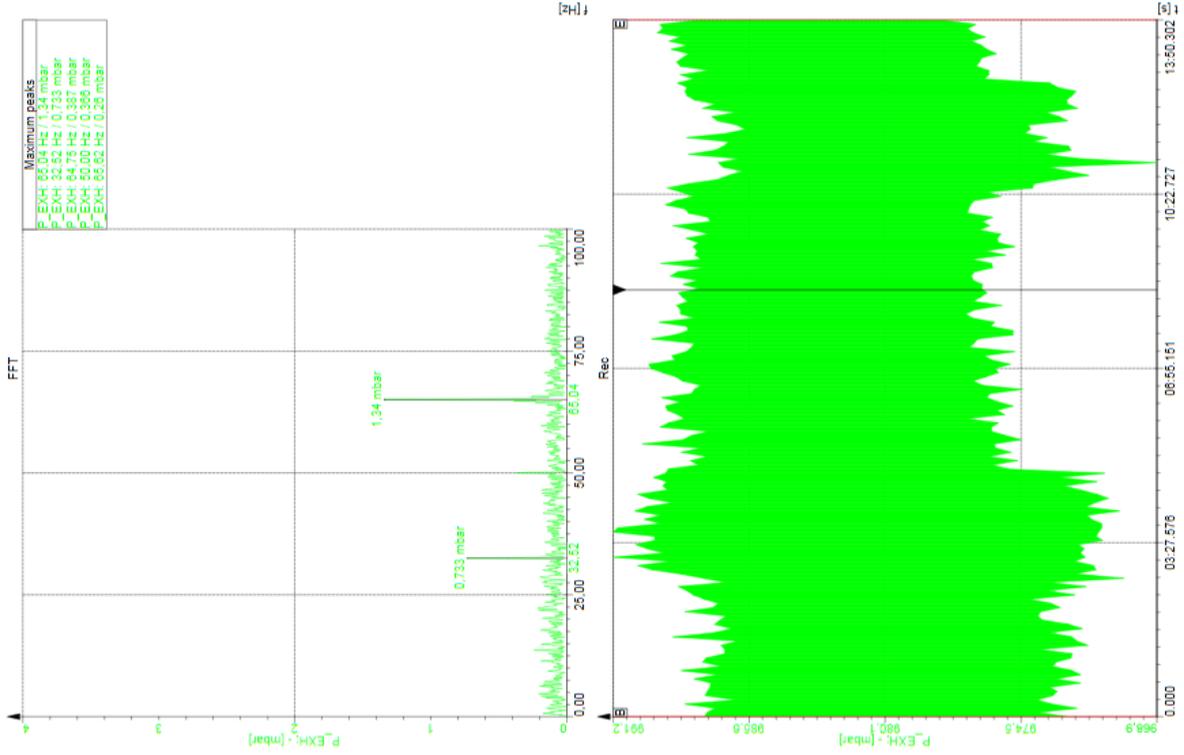
4. Berechnungsergebnis

Strömungsgeschw.	m/s		2,394875901
Reynolds-Zahl			29728,24053
Strömungsgeschw.2	m/s		14,96797438
Reynolds-Zahl 2			74320,60133
Strömungsform		turbulent	
Rohrrauigkeit	mm		
Rohrreibungszahl			
Zeta-Wert			74,38381092
Zeta-Wert abzw.Rohr			
Druckv. abzw.Rohr	mbar		
Druckverlust	mbar		2,44546891
Druckverlust	bar		0,002445469
Summe Druckverlust	bar		0,002445469

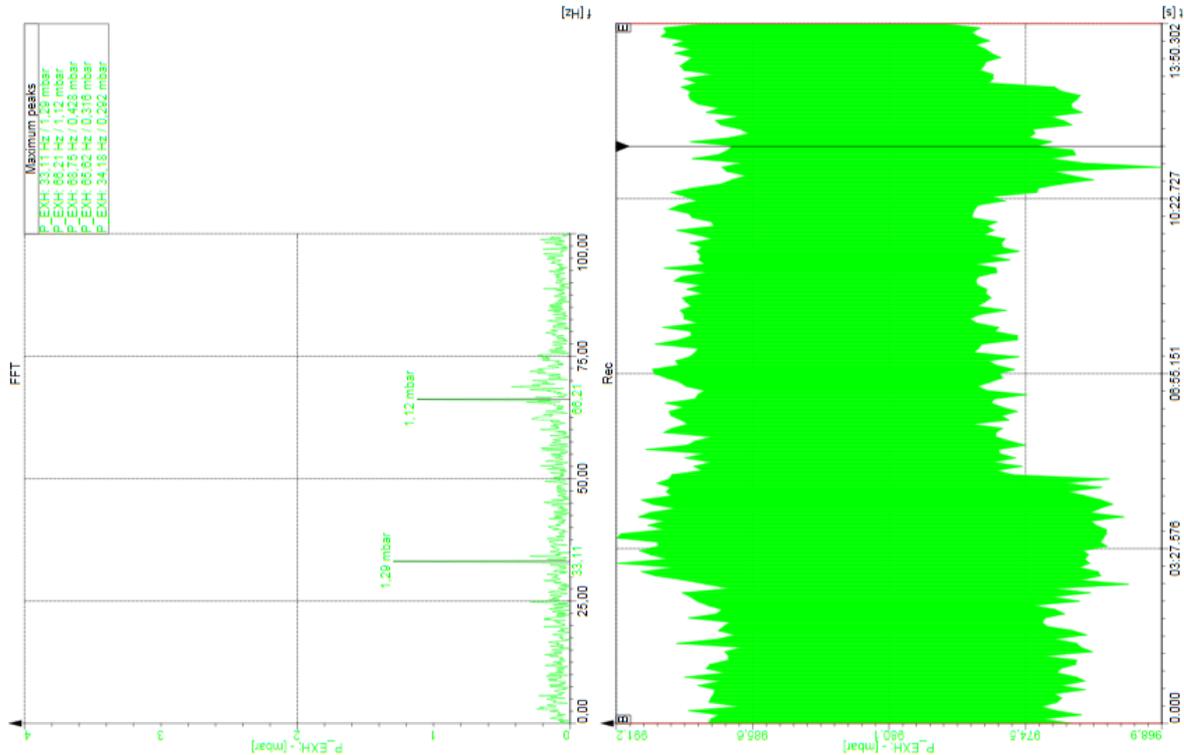
Anhang 5: Frequenzanalyse Stripdown-Versuch



File name: CVS_Messung_2017_07_08_0001_47d
 Date: 06.07.2017; Time: 11:39:23; Show Time = 00:13:50



File name: CVS_Messung_2017_07_08_0001_47d
 Date: 06.07.2017; Time: 11:39:23; Show Time = 00:13:50



Anhang 6: gemittelte Beutel-Emissionen

Bemerkung: offen(1), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	20.07.2017	Luft	8,2	1	0,1	0,046	Volumen 1 [l] 30369
Temp [°C]	24,7	Abgas	568,5	170,5	4,2	0,455	Strecke 1 [km] 3,209
Druck [mbar]	974,5	Luft	5,5	1	0	0,045	Volumen 2 [l] 29865
rel Feuchte [%]	32,2	Abgas	104,7	199,7	4,8	0,48	Strecke 2 [km] 3,383

Bemerkung: offen(2), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	07.09.2017	Luft	8,8	0,9	0,2	0,043	Volumen 1 [l] 30531
Temp [°C]	25,3	Abgas	804,7	207,4	5,5	0,429	Strecke 1 [km] 21
Druck [mbar]	980,9	Luft	8,7	1,1	0,1	0,043	Volumen 2 [l] 29898
rel Feuchte [%]	30,6	Abgas	139,8	191,6	6,2	0,494	Strecke 2 [km] 18,4

Bemerkung: offen(3), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	08.09.2017	Luft	9	1	0,2	0,049	Volumen 1 [l] 30384
Temp [°C]	24,3	Abgas	736,5	222,1	5,6	0,462	Strecke 1 [km] 20,9
Druck [mbar]	978,4	Luft	8,4	1,2	0,1	0,049	Volumen 2 [l] 29905
rel Feuchte [%]	27,9	Abgas	134,5	185	6,1	0,5	Strecke 2 [km] 17,7

Mittelwert offen

Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4
Luft					
Abgas	703,233333	200	5,1	0,44866667	20,95
Luft					
Abgas	126,333333	192,1	5,7	0,49133333	18,05

Bemerkung: geschlossen (1), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	21.07.2017	Luft	8,5	1,3	0,1	0,047	Volumen 1 [l] 30339
Temp [°C]	24,4	Abgas	685	205,4	4,7	0,495	Strecke 1 [km] 3,237
Druck [mbar]	977,8	Luft	7,6	1,3	0,1	0,046	Volumen 2 [l] 29874
rel Feuchte [%]	37	Abgas	108,5	186,1	5,5	0,529	Strecke 2 [km] 3,366

Bemerkung: geschlossen(2), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	11.09.2017	Luft	9,2	1,4	0,1	0,047	Volumen 1 [l] 3,26
Temp [°C]	21,2	Abgas	767	209,7	4,4	0,433	Strecke 1 [km] 19
Druck [mbar]	970,1	Luft	8,7	1,6	0,1	0,046	Volumen 2 [l] 29697
rel Feuchte [%]	61	Abgas	136	160,1	4,7	0,476	Strecke 2 [km] 15,7

Bemerkung: geschlossen(3), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	12.09.2017	Luft	9,5	1	0,1	0,047	Volumen 1 [l] 30544
Temp [°C]	23,6	Abgas	826,6	267,9	5,2	0,451	Strecke 1 [km] 3,23
Druck [mbar]	971,3	Luft	8,8	1,3	0,1	0,046	Volumen 2 [l] 29750
rel Feuchte [%]	28	Abgas	139,3	179,6	6	0,507	Strecke 2 [km] 3,41

Mittelwert geschlossen 2,5

Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4
Luft					
Abgas	759,533333	227,666667	4,76666667	0,45966667	19,2
Luft					
Abgas	127,933333	175,266667	5,4	0,504	15,7

Bemerkung: geschlossen 12.5 (1), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	08.09.2017	Luft	8,5	0,8	0,1	0,046	Volumen 1 [l] 30379
Temp [°C]	22,2	Abgas	734,8	229,6	5,6	0,473	Strecke 1 [km] 20,8
Druck [mbar]	977,8	Luft	8	1	0,1	0,045	Volumen 2 [l] 30012
rel Feuchte [%]	28,4	Abgas	116,5	170,1	6,3	0,516	Strecke 2 [km] 14,5

Bemerkung: geschlossen 12.5 (2), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	11.09.2017	Luft	9,6	0,8	0	0,046	Volumen 1 [l] 30547
Temp [°C]	23,6	Abgas	844	282,3	4,6	0,445	Strecke 1 [km] 3,14
Druck [mbar]	969,9	Luft	9	1,1	0	0,047	Volumen 2 [l] 29880
rel Feuchte [%]	41,6	Abgas	142,3	180,2	5,3	0,52	Strecke 2 [km] 3,38

Bemerkung: geschlossen 12.5 (3), Kaltstart mit Sekundärluft							
	Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4	
Datum	11.09.2017	Luft	8,8	1	0	0,048	Volumen 1 [l] 3,24
Temp [°C]	23,3	Abgas	730,3	219,9	4,7	0,48	Strecke 1 [km] 20,2
Druck [mbar]	969,8	Luft	8,2	1,2	0	0,047	Volumen 2 [l] 29724
rel Feuchte [%]	47,5	Abgas	133	177	5,1	0,52	Strecke 2 [km] 3,34

Mittelwert geschlossen 12,5

Beutel	HC	CO	NOx	CO2	CH4
Luft					
Abgas	769,7	243,933333	4,96666667	0,466	20,3
Luft					
Abgas	130,6	175,766667	5,56666667	0,51866667	15,9