

Diplomarbeit

Nr.:VMO/14/2015

Erstellung und Erprobung eines Entwicklungsfahrzykluses unter dem Aspekt der Real-Driving-Emissions Gesetzgebung

eingereicht an der

Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der

Westsächsischen Hochschule Zwickau

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: cand. ing.

N e u m a n n , R e n é

Geb. am: 16.12.1985

Studiengang Kraftfahrzeugtechnik

Studienschwerpunkt Verbrennungsmotoren

Auftraggeber:

ASAP Engineering GmbH RM

Ausgegeben von:

Prof. Getzlaff

Betreuer des Auftraggebers:

Dipl.-Ing. Philipp Weickgenannt

Autorenreferat

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Entwicklung und dem Vergleich von Entwicklungsfahrzyklen unter dem Aspekt der Real Driving Emissions. Bei den Vergleichsuntersuchungen lag das Hauptaugenmerk dabei auf den Partikel sowie CO₂ Emissionen, welche im Rahmen der neuen Abgasgesetzgebung zunehmend minimiert werden sollen. Zu diesem Zweck wurde ein Messfahrzeug mit einem Partikel-PEMS, einem mobile Partikelcounter, sowie einem Luftmassenmesser und zusätzlichen Lambdasonden ausgestattet. Im Vorfeld werden die Randbedingungen der neuen Abgasgesetzgebung näher analysiert. Des Weiteren wird eine eigene Strecke, die den Anforderungen der Gesetzgebung entspricht, definiert. Ziel dieser Diplomarbeit ist es, aufzuzeigen, wie stark sich Partikel- und CO₂-Emissionen mit zunehmender Verschärfung der Testbedingungen verändern. Dazu soll auch ein Vergleich mit den momentan für die Abgaszertifizierung genutzten Fahrzyklen erfolgen. Weiterhin soll geklärt werden, in wie fern sich die Straßenmessungen reproduzieren lassen.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Idstein im November 2015

René Neumann

Inhalt

I.	Verzeichnis der Bilder	I
II.	Verzeichnis der Tabellen.....	IV
III.	Verzeichnis der Anlagen	V
IV.	Kurzzeichenverzeichnis	VI

Vorwort1

1	Stand der Gesetzgebung und des Gesetzgebungsverfahrens.....	1
1.1	Fahrzyklen.....	2
1.2	Anforderung an die Strecke.....	5
1.3	Mitbestimmung der Gesetzgebung seitens der automobilen Lobby	7
1.4	Anforderung an die Messtechnik.....	9
2	Vorgehensweise beim Erstellen eines allgemeingültigen Entwicklungsfahrzykluses	11
2.1	Auslegung des Stadtfahrabschnittes.....	12
2.2	Auslegung des Überlandfahrabschnittes.....	13
2.3	Auslegung des Autobahnabschnittes	15
2.4	Zusammenführen der einzelnen Streckenabschnitte zum Gesamtfahrzyklus	16
3	Auswertung und Erprobung des Messzyklus	18
3.1	Vorstellung des Messfahrzeuges und der verbauten Messtechnik	18

3.2	Berechnung des Abgasmassenstromes.....	21
3.3	Partikelzählverfahren und Berechnung der Emissionen.....	24
3.3.1	Funktionsprinzip AVL-APC	24
3.3.2	Auf-Ionisierungsverfahren.....	26
3.3.3	Berechnung der Partikel Emissionen.....	28
3.3.4	Vergleich der Partikelzählverfahren	28
3.4	Auswertemethoden	30
3.4.1	Dynamische Auswertung von RDE-Fahrten	30
3.4.2	Moving Average Window	33
3.4.3	Verweildaueranalyse	38
3.5	Auswertung der Messfahrt	39
3.6	Vertrauensbereich des Mittelwertes von RDE-Messfahrten.....	45
3.6.1	Fehlerminimierung durch Pre-und Post-Tests	45
3.6.2	Berechnung des arithmetischen Mittels.....	46
3.6.3	Standardabweichung und Varianz.....	47
3.6.4	Medianberechnung.....	47
3.6.5	Vertrauensbereich des Mittelwertes.....	48
4	Untersuchen der Auswirkungen bei Verschärfung von den Randbedingungen .	51
4.1	Vergleich der Fahrzyklen	52
4.2	Einfluss der Temperatur.....	57

4.3	Topographie-Einflüsse	60
4.4	Einfluss der Fahrdynamik.....	66
4.5	Verunreinigungen im Einspritzsystem	71
5	Schlussfolgerung und Ausblick	74
	Literaturverzeichnis	76

I. Verzeichnis der Bilder

Nr.	Titel	Seite
1	Fahrzyklen im Vergleich [4]	5
2	RDE-Fahrzeug mit Gas-PEMS	10
3	Idstein Stadtkurs	13
4	Überlandstrecke des EFZ Idstein	14
5	Autobahnstrecke des EFZ Idstein.....	15
6	Messfahrzeug der ElingKlinger Motorentchnik GmbH Idstein	19
7	Funktionschema der Messtechnik	21
8	AVL-APC Funktionsprinzip	25
9	Streulichtverfahren mit Butanolverdünnung.....	26
10	Auf-Ionisierungsverfahren.....	27
11	Vergleich von AVL-APC und Pegasor Mi2.....	29
12	Häufigkeitsverteilung der Trip-Dynamik	30
13	CO ₂ -Kennlinie mit Toleranzbändern [1, S.68].....	34
14	Erstellen der Fenster für MAW-Methode	36
15	Auswertung der MAW-Methode mit AVL Concerto.....	37
16	Aufenthalt im Motorkennfeld	38

17	Verbundklassifizierungskennfeld der Verweildauer	39
18	Zusammenfassung der Auswertung	40
19	Partikelemission RDE Idstein	42
20	Partikelemissionen bei unterschiedlichen Beschleunigungen.....	44
21	Abweichung vom Mittelwert und Vertrauensbereich von gleichgefahrenen Straßenmessungen	50
22	Kennfeldaufenthalte der einzelnen Fahrzyklen.....	53
23	Emissionsvergleich der Fahrzyklen	54
24	Dynamische Auswertung der verschiedenen Fahrzyklen	55
25	Verlauf der Partikelemissionen bei unterschiedlichen Starttemperaturen.....	58
26	Verlauf der CO ₂ Emissionen bei unterschiedlichen Starttemperaturen.....	59
27	Verlauf der Partikelemissionen bei Messfahrt mit unterschiedlicher Steigungsprofilen.....	61
28	Verlauf der Partikelemission im Überlandabschnitt der verschiedenen RDE Messfahrten mit unterschiedlichen Steigungen und dazugehörigen Höhenprofilen.	62
29	Verlauf der CO ₂ Emissionen bei Messfahrt mit unterschiedlicher Steigungsprofilen	64
30	Verlauf der CO ² Emission im Überlandabschnitt der verschiedenen RDE Messfahrten mit unterschiedlichen Steigungen und dazugehörigen Höhenprofilen	65
31	Verlauf der Partikelemission bei unterschiedlicher Fahrdynamik.....	67

32	Verlauf der CO ₂ Emissionen bei unterschiedlicher Fahrdynamik	68
33	95 Percentile unter Verwendung unterschiedlicher Fahrprofile	69
34	Kennfeldaufenthalte bei unterschiedlichen Fahrweisen.....	70
35	Verlauf der CO ₂ Emissionen bei verunreinigten Einspritzventilen	72
36	Partikelemissionen bei verunreinigten Einspritzventilen	73

II. Verzeichnis der Tabellen

Tabelle	Titel	Seite
1	Parameter der Fahrzyklen [1][2][3].....	5
2	Übersicht der einzelnen Streckenabschnitte	16
3	Zusammenfassung der Streckenabschnitte als Zyklus	16
4	Vergleich der RDE-Messfahrten.....	49

III. Verzeichnis der Anlagen

Anlage Titel

[1] Vergleich der Gesetze

[2] Kalibrierkurve des Heißfilmluftmassenmessers

IV. Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen		Bedeutung
ACEA	-	Europäischer Automobilherstellerverband
CAN	-	Controller Area Network
CO	-	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
CVS	-	Constant Volume Sample
ECU	-	Motorsteuergerät
EFM	-	Exhaust Flowmeter
EFZ	-	Entwicklungsfahrzyklus
GPF	-	Gasoline Partice Filter
GPS	-	Global Positioning System
JRC	-	Joint Research Center
KBA	-	Kraftfahrzeug Bundesamt

MAW	-	Moving Average Window
NEFZ	-	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO _x	-	Stickstoffoxid
OBD	-	On Board Diagnose
OEM	-	Fahrzeughersteller
PEMS	-	Portable Emission Measurement System
PM	-	Partikelmasse
PN	-	Partikelzahl
RDE	-	Real Driving Emissions
TCMV	-	Technical Committee of Motor Vehicle
TFSI	-	Twinshot Stratified Injection
TÜV	-	Technischer Überprüfungsverband
UMTS	-	Universal Mobile Telecommunications System
VAG	-	Volkswagen AG

VDA	-	Verband der Automobilindustrie
WLAN	-	Wireless LAN
WLTC	-	World Harmonized Light Vehicle Test Cycle
WLTP	-	World Harmonized Light Vehicle Test Procedure

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
---------------	---------	-----------

a_i	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung
a_{pos}	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	positive Beschleunigung
CF	-	Konformitätsfaktor
I_p	A	Pumpstrom
L_{min}	$\frac{\text{kgLuft}}{\text{kgKraftstoff}}$	Mindestluftbedarf
$M_{\text{CO}_2,i}$	kg	Masse an Kohlendioxid für MAW-Methode

m	kg	Masse
\dot{m}_{Abgas}	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	Abgasmassenstrom
\dot{m}_{Ansaug}	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	Ansaugluftmassenstrom
\dot{m}_{Kst}	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	Kraftstoffmassenstrom
n	-	Anzahl der Messung
n_{ges}	%	Gesamtanzahl
n_{Kl}	%	Anzahl in den Klassen
n_{rel}	%	Relative Anzahl
P	kW	Leistung
P_{Abgas}	Pa	Abgasdruck
R_{Luft}	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	spezifische Gaskonstante für Luft
s	km	Weg
T_{Abgas}	K	Abgastemperatur

t	-	Student-Verteilung
tol_1	%	Toleranzgrenze 1
tol_2	%	Toleranzgrenze 2
U_λ	V	Lambdasondenspannung
U_{MAF}	V	Spannung am Luftmassenmesser
\dot{V}_{Abgas}	$\frac{m^3}{h}$	Abgasvolumenstrom
v	$\frac{km}{h}$	Geschwindigkeit
Δx	-	Vertrauensbereich
λ_v	-	Verbrennungsluftverhältnis
ρ_{Abgas}	$\frac{kg}{m^3}$	Abgasdichte
σ		Standartabweichung

Vorwort

Ermöglicht wurde diese Arbeit durch eine Kooperation der ASAP Engineering GmbH in Rüsselsheim und der Elring/Klinger Motortechnik GmbH in Idstein. Besonders danken möchte ich daher Dr. Gerald Eifler, der Grundstein für diese Arbeit gelegt hat und mir bei Anfertigung dieser Diplomarbeit betreuend zur Seite stand.

Ein herzliches Dankeschön geht außerdem an Volker Schier und Phillip Weickgenannt, deren Anregungen und Ideen, ebenfalls Einfluss auf die Anfertigung Diplomarbeit hatten.

Sehr bedanken möchte ich mich auch, bei meinen Kollegen von der Elring/Motortechnik GmbH, die mich herzlich in ihren Kreisen aufgenommen haben und mich bei Problemen kräftig unterstützt haben.

Für die Bereitstellung der Messtechnik und der Literatur dieser, möchte ich Michael Krüger von der AVL sowie den Herren der Firma MS4 Messtechnik danken.

Mein Dank gebührt auch allen Professoren der Westsächsischen Hochschule in Zwickau, die durch die Vermittlung ihres Wissens, den Einstieg ins Berufsleben vorbereitet haben.

Zu guter Letzt danke ich meiner Lebensgefährtin und meiner Familie für die Unterstützung während meiner Studienzeit.

1 Stand der Gesetzgebung und des Gesetzgebungsverfahrens

Seit Jahrzehnten stellt die Typprüfung auf dem Abgasrollenprüfstand die Hauptanforderung hinsichtlich der CO₂- und Abgasemission von Kraftfahrzeugen dar. In den letzten Jahren beschäftigten sich verschiedenste Institute mit dem immer näher ins Bewusstsein rückenden Thema der Luftverschmutzung. Mit teilweise erschreckenden Ergebnissen. So wurde zum Teil in unabhängigen Messkampagnen, das bis zu siebenfache an schädlichen Emissionen bei Messungen auf der Straße ermittelt, gegenüber dem, was die Europäische Kommission als Grenzwert für die Euro 6 angibt. Aufgrund der Luftreinhalteverordnung stehen gerade die gefährlichen Stickoxide im Fokus der Messungen. Zudem ist auch die Problematik der Partikelemissionen bei direkteinspritzenden Ottomotoren eine Herausforderung für die Automobilindustrie geworden. Durch eine Vielzahl von Veröffentlichungen und Ereignissen resultiert zunehmend Kritik an der Realitätsferne des Messverfahrens und es werden Anstrengungen unternommen, die Nachteile der Laborprüfung zu beseitigen, welche nur einen geringen Teil der möglichen Fahrzustände abbildet. Aus diesem Grund treten ab 2017 neue Regularien in Kraft. Der Gesetzgeber fordert zusätzlich, über die Lebensdauer des Fahrzeuges, die Messung von Emissionen nicht nur unter Laborbedingung, sondern auch auf Straßen im realen Fahrbetrieb. Das Konzept der Real Driving Emissions kurz RDE soll dieser Anforderungen gerecht werden. Real Driving Emissions beinhaltet das Messen von Abgasemissionen auf der Straße unter alltäglichen und realen Bedingungen. Der Beschluss zur RDE Thematik wurde vom EU Fachausschuss am 19.05.2015 endgültig verabschiedet. Für den Fahrzeughersteller und den TIER 1-Zulieferer besteht jedoch aus Gründen der Vergleichbarkeit die Notwendigkeit, das RDE-Verfahren für eine Vielzahl von Fahrzuständen auf ein vergleichbares Niveau zu bringen. Denn das Problem sind die durch die Gesetzgebung vorgegebenen Fahr- und Randbedingungen. Diese sind so komplex, allgemeingültig und in einem gewissen Maße zufallsbedingt, dass eine Reproduzierbarkeit nur sehr schwer möglich ist. Die Applikation der Fahrzeuge auf einen bestimmten Kennfeldbereich ist dadurch unmöglich geworden, beziehungsweise wird die Abstimmung der Motoren durch die Gesetzgebung zunehmend erschwert. Die Aufgabe dieser Diplomarbeit ist es, einen Entwicklungsfahrzyklus unter dem Aspekt der Real Driving Emissions

Gesetzgebung zu entwickeln, diesem mit einem Messfahrzeug zu erproben und herauszuarbeiten, welche Fahrzustände als besonders kritisch gegenüber den gängigen Rollenprüfstandstests anzusehen sind. Alle in dieser Diplomarbeit durchgeführten Versuche wurden ausschließlich mit einem mobile Messgerät zur Partikelzählung durchgeführt. Zusätzlich erfolgte eine Auswertung der Kraftstoffsverbrauchsmessung, um simultane Werte für die CO₂-Emissionen zu erhalten.

1.1 Fahrzyklen

Kernstück der momentanen Abgashomologation und Kraftstoffverbrauchsermittlung bildet der „Neue Europäische Fahrzyklus“ NEFZ. Der Fahrzyklus sollte ursprünglich eine realitätsnahe Beanspruchung des Fahrzeuges widerspiegeln. Doch wirkt die Testprozedur durch die eng tolerierten Bedingungen auf dem Rollenprüfstand nicht mehr zeitgemäß und künstlich. Die Temperaturen für die Konditionierung sind festgelegt in einem Bereich von 20 bis 30 °C. Das Fahrzeug ist vor dem Ablauf der Testprozedur mindesten 6 Stunden bei diesen Temperaturen zu konditionieren. Die Öl und Kühlmitteltemperatur sollte ebenfalls in diesem Bereich liegen. Selbst Schaltpunkte und Dynamik des Fahrzeuges sind vorgeschrieben. Um die Messung auf den Prüfstand zu übertragen, wird mittels eines Ausrollversuches Koeffizienten ermittelt. Aus diesem Grund werden Fahrzeuge oft in Vorbereitung auf den NEFZ mit erhöhtem Luftdruck und der kleinstmöglichen Rad/Reifen-Kombination ausgestattet. Auch in Bezug auf die Fahrzeugmasse wird die leichteste Fahrzeugvariante bevorzugt genutzt. Nebenverbraucher sind während der Testprozedur zu deaktivieren. [1] Genauere Angaben zum den Fahrzyklen sind in der Tabelle 1 S.5 und in Bild 1 zu finden.

Der NEFZ soll ab 2017 durch den“ Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures/Cycles“ kurz WLTP/WLTC ersetzt werden. Der WLTP hat im Vergleich zum NEFZ eine höhere Dynamik. Dies beinhaltet sowohl einen höheren Anteil an Beschleunigung als auch an Verzögerungen [2]. Eine wichtige Neuerung ist die Einführung von fahrzeugspezifischen Fahrprofilen. So wird es drei Klassen geben. Die Einteilung in die Klassen erfolgt über die Berechnung einer spezifischen Fahrzeugleistung. Hierfür wird die Leistung des Fahrzeuges durch das Fahrzeuggewicht dividiert.

$$P_{MR} = \frac{P}{m}$$

Die Klasseneinteilung wird dann wie folgt vorgenommen:

- Class 1 $P_{mr} \leq 22$ W/kg
- Class 2 $P_{mr} > 22$ W/kg und ≤ 34 W/kg
- Class 3 $P_{mr} > 34$ W/kg

Die meisten handelsüblichen PKW-Fahrzeuge werden in „Class 3“ eingruppiert. Zusätzlich dazu können sich die klassenspezifischen Fahrprofile ändern, wenn das Fahrzeug eine gewisse Höchstgeschwindigkeit überschreitet. Die Schwierigkeit des WLTP ist aber nicht nur das zu absolvierende Fahrprofil, sondern auch die geänderten Randbedingungen. Die meisten der im NEFZ aufgeführten Randbedingungen sind verschärft worden. Es wurden präzisere Angaben zur Aerodynamik, Reifengröße, Luftdruck der Reifen und anderen Einflussfaktoren getroffen. Es ist außerdem zulässig Verbraucher am Fahrzeug zu benutzen. Die einzige Ausnahme bildet hierbei die Klimaanlage, die wie beim NEFZ nicht genutzt werden darf.

Wie in der Einleitung bereits erklärt, fordert der Gesetzgeber künftig für die Typisierung von Fahrzeugen, zusätzlich zum WLTP, die Messung der Abgasemissionen bei Fahrten auf der Straße. Die Messfahrten werden dann in allen beteiligten Ländern durchgeführt. Die Prüfinstitute sind dadurch an die jeweiligen Gesetze und Sicherheitsvorschriften des Landes gebunden. Zusätzlich erschwert die geografische Topografie der unterschiedlichen Länder die Vergleichbarkeit. Um all diese Einflussgrößen vereinbaren zu können, unterscheidet man bei den allgemeinen Randbedingungen in „moderat“ und „erweiterten“ Randbedingungen. Diese Einteilung hat Einfluss auf die Wichtung der Konformitätsfaktoren. Ein Test wird dabei als „erweitert“ anerkannt, wenn sich entweder die Höhe oder die Temperatur der Messfahrt im „erweiterten“-Bereich befindet. Die Höhe bei der die Fahrten durchgeführt werden dürfen, erstreckt sich von 0-700m ü.n.N für den „moderat“ Bereichen und für den „erweiterten“ Bereich gilt eine Höhe von 700m bis einschließlich 1300m. Der Temperaturbereich von 0°C bis 30°C. Für den „erweiterten“ Temperaturbereich gibt es jeweils eine obere und untere neue Grenze. Die obere Grenze erstreckt sich von 30°C-35°C und die untere von -7°C bis 0°C. Die Intension der europäischen Kommission ist es, eine Fahrt unter „normalen“ Bedingungen abbilden zu

können. Für die Zertifizierung sollten diesen Messfahrten nur werktags zwischen 9 und 17 Uhr gefahren werden. Unter dem Schlagwort „normal“ zählt auch die Benutzung von fahrzeugtypischen Zusatzeinrichtungen, wie etwa die Klimaanlage, die ihre Versorgung aus dem Antriebsstrang beziehen [3] S. 14f. Die Nutzung der Zusatzeinrichtungen war im NEFZ noch untersagt und beim WLTP eingeschränkt. Durch die Messung der Abgasemissionen auf der Straße, wird die EC den Anforderungen gerecht, die Typisierung von Fahrzeugen realitätsnaher zu gestalten. Der Kaltstart wird bei einer RDE-Messfahrt im Grunde nicht direkt berücksichtigt, da diese bereits im WLTP enthalten sind. Alle Emissionen die aufgezeichnet werden, wenn der Motor noch keine Kühlmitteltemperatur von 70°C erreicht hat, werden nicht gewertet [3] S. 54. Hingegen kann die Regeneration eines Filters schon mit in die Bewertung einfließen. Zwar kann der Hersteller einen Test, indem es zu einem Regenerationsevent gekommen ist, annullieren. Doch sind die Fahrzeughersteller verpflichtet, das Fahrzeug unverzüglich neu zu konditionieren und die Messung zu wiederholen. Gewertet werden die Abgasemissionen der Regeneration nur, wenn auch in der wiederholten Prüfung ein Regenerationsevent auftritt [3] S.15. Auch für das Fahrzeuggewicht wurden Bedingungen erstellt. So darf das Fahrzeug mit Messtechnik und dem Fahrer, während der Straßenmessung, maximal 90% des Gesamtgewichtes wiegen. Eine weitere Neuerung, die die RDE-Gesetzgebung mit sich bringt, ist die Nachkontrolle der Fahrzeuge. So kann ein Fahrzeughersteller aufgefordert werden, einige seiner Flottenfahrzeuge nochmals einer RDE-Messung unterziehen zu lassen und somit Abgasemissionen auf der Straße zu überprüfen. So soll gewährleistet werden, dass auch nach mehreren Monaten in Fahrbetrieb annähernd gleiche Abgaswerte emittiert werden. Die Begutachtung im Rahmen der Nachkontrolle erfolgt stichprobenartig.

Tabelle 1: Parameter der Fahrzyklen [1][2][3]

	NEFZ	WLTC	RDE
Zyklusdauer	20 min	30 min	90...120 min
Zyklusstrecke	11 km	23.25 km	variiert
Starttemperatur	kalt	kalt	70°C T _{Kühl}
Standzeitanteil	25 %	13 %	min. 10 %
Max.	120 km/h	131 km/h	145...160 km/h
Nebenverbraucher	keine erlaubt	keine Klimaanlage	alle erlaubt

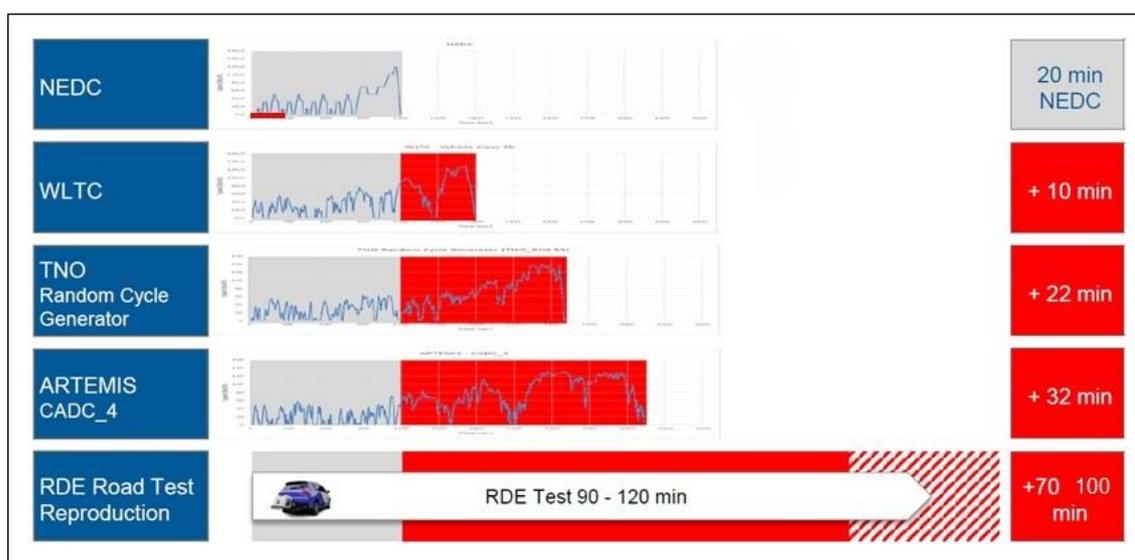


Bild 1: Fahrzyklen im Vergleich [4]

1.2 Anforderung an die Strecke

Die Ansprüche die der Gesetzgeber an die Strecken eines Messzyklus stellt sind sehr weitreichend. So gibt er nicht nur Geschwindigkeiten und Sequenzaufteilung der RDE-Streckenprofile vor, sondern auch einzuhaltende Leerlaufanteile, eine Mindest-/ sowie Höchstdauer und Mindeststrecken die zurückgelegt werden müssen. Wie schon bei dem WLTC ist ein RDE-Zyklus in mehrere Abschnitte unterteilt. Einem Stadtabschnitt, einem Überlandabschnitt und einem Autobahnabschnitt. Die jeweiligen Anteile unterscheiden

sich nur durch ihre Geschwindigkeiten. So zählen Streckenabschnitte die mit Geschwindigkeiten bis zu 60 km/h gefahren werden als Stadtfahrt. Streckenabschnitte die mit einer Geschwindigkeit von 60 bis 90 km/h gefahren werden, sind dem Überlandabschnitt zuzuordnen und Fahrten über 90 km/h werden als Autobahnfahrt gewertet. Dementsprechend werden Ortschaften die während des Überlandabschnittes, mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h, durchfahren werden als Stadtfahrten gewertet. Dasselbe gilt natürlich auch für Baustellen, die auf der Autobahn durchfahren werden und so dementsprechend als Überlandfahrt oder Stadtfahrt gewertet werden müssen. Die Streckenabschnitte sollen in annähernd gleichen Anteilen, in der Reihenfolge: Stadt→Überland→Autobahn, durchfahren werden. Es sollten in den jeweiligen Abschnitten mindestens 16 Kilometer zurückgelegt werden. Der Gesetzgeber sieht eine Toleranz von $\pm 10\%$ für die Streckenabschnitte vor. Eine Ausnahme bildet jedoch die Stadtfahrt. Hier darf der Mindeststreckenanteil nicht weniger als 29% betragen. Anfangs wurden die Streckenanteile noch prozentual zur Gesamtzeit der Fahrt aufgeteilt. Mittlerweile wurde dies allerdings geändert und die Streckenanteile sind nun prozentual zur Gesamtstrecke aufzuteilen. Die RDE-Testprozedur wird auf öffentlichen und nicht abgesperrten Straßen durchgeführt. Somit ist der Fahrer in der Pflicht, sich an die jeweiligen Tempolimits der Strecke sowie den Verkehrsregeln zu halten. Die Höchstgeschwindigkeit während des Fahrzyklus beträgt 145 km/h. Diese Grenze darf nur für eine relativ kurze Zeit um 15km/h überschritten werden. Die Einführung des Tempolimits ist vor allem in Deutschland sinnvoll, da es hier auf der Autobahn oft keine Geschwindigkeitsbeschränkungen gibt. Als Richtlinie für Autobahnfahrten gilt, dass sich das Fahrzeug für mindestens 5 Minuten eine Geschwindigkeit 100 km/h überschreiten sollte. Zusätzliche Parameter sieht die Kommission auch bei dem Stadtfahranteil vor. So darf die Durchschnittsgeschwindigkeit in Stadt lediglich 15 bis 30 km/h betragen. Auch die Leerlaufanteil bzw. Stillstandphase sind vorgeschrieben. So muss während der Messfahrt eine Mindeststandzeit von 10% der Stadtfahrzeit erreicht werden. [3 S. 15f.] Nun steht jedoch momentan noch zur Diskussion, wie lang ein Fahrzeugstillstand überhaupt sein darf, damit er überhaupt noch als verkehrsrelevant gilt. Weshalb sich die TCMV auch dazu entschieden die Dauer eines Fahrzeugstillstandes zu begrenzen. Es soll so sichergestellt werden, dass es während der Stadtfahrt zu viele kurzzeitig Fahrzeugstillständen kommt.

1.3 Mitbestimmung der Gesetzgebung seitens der automobilen Lobby

Im Zuge der Gesetzgebung konfrontiert die Lobby der Automobilindustrie des Öfteren die Europäische Kommission mit Forderungen, die mit in die Gesetzgebung übernommen werden sollten. Man versucht dadurch die Gegebenheiten, die eine Straßenmessung beeinflussen können, zu begrenzen. So wurden in der 48.ten Sitzung der TCMV (Juli 2015) einige Vorschläge eingebracht. Ein wichtiger Punkt stellt dabei die Bewertung der Fahrdynamik da. Es wurde ein System zur Bewertung von Beschleunigungsvorgängen vorgeschlagen, welches ich im Kapitel 3 näher erläutern werde. Ein Einfluss auf die Beschleunigung des Fahrzeuges hat, neben der Wahl des Ganges, bei neueren Fahrzeugen unter anderem auch die Wahl des jeweiligen Fahr-Modus. Zu diesen beiden Punkten hat man sich in der Juli Sitzung der TMCV noch nicht geäußert. Es gab lediglich einen Vermerk, ob man Restriktionen bezüglich der Schaltstrategie und der Auswahl des Fahr-Modus einführen sollte [5] S. 4. Einen weiteren Kritikpunkt der ACEA sind die recht engen Vorgaben bei dem Stadtfahranteil der Fahrzyklen. Die ACEA ist hierbei bestrebt nicht nur die Durchschnittsgeschwindigkeit zu erhöhen, sondern auch die Leerlaufanteile in einem anderen Kontext zu werten. Außerdem versucht man die Charakterisierung der Streckenanteile an die Heavy Duty Gesetzgebung anzulehnen. Für den Heavy Duty Bereichen gelten für die Strecke andere Regularien. Die Streckenabschnitte werden auch nicht wie bei den PKW-Fahrzeugen über die Geschwindigkeit klassifiziert, sondern werden Punkte auf der Strecke gesetzt an den die Streckenabschnitte enden beziehungsweise anfangen. Oder man bedient sich der „Methode der ersten Beschleunigung“. So beginnt der neue Streckenabschnitt, sofern einen festgelegt Geschwindigkeit überschritten wurde.

Stark in der Diskussion sind ebenfalls die CF-Wert, sprich die Konformitätsfaktoren. Die Abgasgrenzwerte der RDE-Zertifizierungsfahrten setzen sich wie folgt zusammen:

$$RDE_{\text{Abgasgr}} = CF_{\text{Abgasgr}} \cdot \text{Euro} - 6$$

Die CF-Werte sollen als Faktor zusammen mit den Richtwerten der EURO 6 die Grenze der RDE-Abgasemissionen bilden. Die ACEA wünscht sich für die Umsetzung der Gesetzgebung einen Zwei-Stufen Plan. Die CF-Werte sollen anfangs einen recht hohen Wert von 3,5, beziehungsweise 5 bei „erweiterten“-Fahrten, annehmen und mit der Zeit auf 2 beziehungsweise 3 sinken. Die Europäische Kommission hat im September 2015 folgende Konformitätsfaktoren für NO_x-Emissionen beschlossen:

- $C_{F_NOx} = 2,1$ ab September 2017
- $C_{F_NOx} = 1,5$ ab September 2019

Die Konformitätsfaktoren für die anderen Abgasemissionen befinden sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch in der Diskussion.

Eine mögliche Erweiterung der Konformitätsfaktoren, durch sogenannte Transferfunktionen, wurde in der 49. Sitzung des TCMV (September 2015) vorgestellt. Durch die Verwendung der Transferfunktion sollen sich die Konformitätsfaktoren zusätzlich verändern. Der Konformitätsfaktor soll dann wie folgt gebildet werden:

$$CF_{TF} = CF_{Abgas} \cdot TF$$

Der Faktor TF verändert sich dabei je nach Abweichung der Messfahrt innerhalb der Randbedingungen. Je anspruchsvoller die Messfahrt in Bezug auf die Randbedingungen wird, desto höher wird der Faktor TF. Der Gedanke dahinter ist, dass so auch Fahrten unter sehr herausfordernden Bedingungen gültig bleiben [6].

Aber gerade die Transfer Funktion empört die Organisation Transport & Environment. In einer Veröffentlichung beschreibt die T&E die Transfer Funktion, als Versuch der ACEA die Grenzen der Euro6c abzumildern und eine weitere Verschiebung der RDE-Gesetzgebung zu bewirken [7].

Eine Gegenüberstellung der Parameter des RDE-Gesetzes aus Sicht der ACEA und der Europäischen Kommission ist in Anlage 1 zu finden.

1.4 Anforderung an die Messtechnik

Die Umsetzung des RDE-Gesetzes ist nicht nur eine Herausforderung für Automobilindustrie, sondern auch für die Lieferanten der Messtechnik. Eine dieser Herausforderungen war die Konzipierung der Portable Emission Measurement Systems- (PEMS). Das PEMS besteht dabei aus folgenden Komponenten:

- einen Abgasanalyse
- Sensorik zum messen bzw. bestimmen des Abgasmassenstromes
- GPS
- Wetterstation
- Separater Energieversorgung für die PEMS

Zu Beginn der Konzipierung waren die ersten Prototypen noch auf landwirtschaftlichen Zugmaschinen verbaut und wurden nach und nach für den Einsatz im PKW-Bereich weiterentwickelt [8]. Momentan besteht die Möglichkeit die Messtechnik intern im Fahrzeug, als auch extern am Fahrzeug zu verbauen. Beide Möglichkeiten bieten ihrer Vor und Nachteile. Für einen inneren Aufbau muss die gesamte Messtechnik in das Fahrzeug eingebaut werden. Man verändert dadurch zwar nicht die Aerodynamik des Fahrzeuges, doch bietet nicht jedes Fahrzeug den ausreichenden Raum um diesen Aufbau zu bewerkstelligen. Ein großer Risikofaktor ist bei dieser Art des Aufbaus auch, dass man die Abgase des Fahrzeuges direkt in das Fahrzeug leitet. Hier sollte große Vorsicht geboten sein. Eine Belüftung des Fahrzeugraumes ist zwingend erforderlich. Zusätzlich sollte die Fahrt nicht ohne Kohlendioxidmelder angetreten werden. Durch dieses Risikopotenzial bieten viele Messtechnikhersteller den Aufbau auf modifizierten Fahrradträger an. Die Verwendung einer Anhängzugvorrichtung wird dafür vorausgesetzt. Ein weiterer Vorteil ist die schnelle Aufbauzeit. Somit ist es möglich, eine schnelle Umrüstung auf unterschiedlichen Fahrzeug zu realisieren. Im Laufe der Evolution der PEMS ist es den Hersteller gelungen die Messtechnik immer kompakter zu gestalten. Zum Gegenwärtigen Stand könnte es jedoch Probleme bezüglich der Stützlast kommen. Im Schnitt wiegen die PEMS in der Regel circa 70kg. Dies ist für die meisten Fahrzeug noch innerhalb der Toleranz, doch kann es gerade bei Kompakt oder Kleinwagen zu einen Problem werden. Die Messtechniklieferanten müssen noch

kompaktere Systeme entwickeln oder Kompromisse eingehen, um dieses Problem zu lösen.



Bild 2: RDE-Fahrzeug mit Gas-PEMS

Für die Typprüfung muss der Abgasmassenstrom gemessen werden [3 S.12]. Dies geschieht über ein Exhaust-Flowmeter, welche hinter den Endschalldämpfern des Fahrzeuges befestigt werden. Die Automobilhersteller sind deshalb aufgefordert ihre Abgasanlagen so konstruieren, dass es ohne weiteres möglich ist eine EFM zu verbauen, ohne dass die Abgasmassenstrommessung verfälscht wird. Zusätzlich dazu sollte Zugang zu nötigen ECU-Daten gewährleistet sein, um die Daten des EFM gegebenenfalls abgleichen zu können.

Dieses Kapitel zeigt deutlich, dass auch der Umbau eines normalen PKW zu einem Messfahrzeug durch aus aufwändig ist.

2 Vorgehensweise beim Erstellen eines allgemeingültigen Entwicklungsfahrzykluses

Um einen allgemeingültigen Entwicklungsfahrzyklus unter dem Aspekt der RDE-Gesetzgebung zu erstellen, sollte man sich im Vorfeld mit der Gesetzmäßigkeit beschäftigen. Diese wurde im vorhergehenden Kapitel näher erläutert und abgehandelt und zeigte deutlich die Komplexität der Gesetzgebung und die Vielzahl der verschiedensten Bedingungen. Sind die allgemeinen Randbedingungen bekannt, kann mit dem Streckendesign begonnen werden. Es ist zweckmäßig die Strecke des RDE Zyklus so zu führen, dass keine unnötigen Umwege und daraus resultierende Zeitverluste in Kauf genommen werden müssen. Im schlimmsten Falle könnte aus einer einzigen Messfahrt, die im Normalfall 90 bis 120 Minuten dauert, 240 Minuten werden. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn man im Rahmen der Erprobung möglichst viele Messkampagnen durchfahren möchte. Im Regelfall ist ein gutes Streckdesign ohne großen Aufwand realisierbar, da viele OEM's und Zulieferer in Gebieten mit einer gut ausgebauten Verkehrsinfrastruktur sitzen. Das Streckendesign sollte daher durch die Lage unproblematisch sein. Man gelangt von den Firmen schnell in urbane Gebiete und/oder hat im günstigen Falle sogar eine Autobahnanbindung in Standortnähe. So können die Zyklen gemäß der gesetzlichen Abfolge (Stadt → Überland → Autobahn) absolviert werden. Wichtig ist es hierbei die lokale Gegebenheit zu kennen, um mögliche Änderungen in der Streckenführung durchführen zu können. Anhand eines Beispiels soll die Vorgehensweise für die Erstellung eines RDE-Zyklus näher erläutert werden. Der Startpunkt des Zyklus ist das Unternehmen ErlingKlinger Motortechnik GmbH in Idstein. Idstein bietet durch seine Autobahnauffahrten und einer relativ großen Stadtfläche, gute Voraussetzungen für die Erstellung eines RDE-Zyklus. Eine Vorauslegung der Strecke kann über gängige Routenplaner erfolgen.

2.1 Auslegung des Stadtfahrabschnittes

Die Herausforderung bei der Erstellung des Streckenabschnitts im städtischen Gebiet besteht vorrangig darin, die maximale Durchschnittsgeschwindigkeit von 30 km/h nicht zu überschreiten und die erforderliche Standzeit zu erfüllen. Hierbei sollte man seine Streckenplanung so auslegen, dass man entweder relative viele Standzeiten durch Ampelkreuzungen bekommt oder die Strecke durch verkehrsberuhigte Bereiche führt. Ein hoher Standzeitanteil hat automatisch ein Absenken der Durchschnittsgeschwindigkeit zur Folge. Das Erreichen der minimalen Geschwindigkeit von 15 km/h ist unproblematisch. Bild 3 zeigt ein Auslegungsbeispiel für den Stadtkurs von Idstein. Es ist deutlich zu sehen, dass der Stadtkurs des RDE-Idstein als Rundstrecke ausgelegt ist. Aus dem vorherigen Kapitel wissen wir, dass die Streckenabschnitte Stadt, Überland und Autobahn mindestens 16 km betragen müssen, daher bietet die Auslegung des Stadtstreckenabschnittes als Rundstrecke in dieser Hinsicht einige Vorteile. Zum einen bleiben die zurückgelegte Strecke und Dauer einer Runde annähernd gleich. Nach der Erprobung der Strecke kann dementsprechend die Anzahl der Runden angeglichen werden. Zum anderen ist es leichter sich eine Rundstrecke von 5 Kilometern einzuprägen. Das ist vor allem dann von Vorteil, wenn Testfahrer in die Strecke eingewiesen werden sollen und keine programmierbaren Navigationsgeräte zur Verfügung stehen. Im Falle des Stadtrundkurses von Idstein erhalten wir durch mehrere Verbindungen zu einer Bundesstraße, eine höhere Flexibilität, um unsere Zielvorgaben erfüllen zu können. Etwa 40 Prozent der Strecke verläuft durch verkehrsberuhigte Bereiche mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h. Auf der Bundesstraße können wir die Geschwindigkeit von 60 km/h überschreiten und können so in die Überlandphase übergehen.

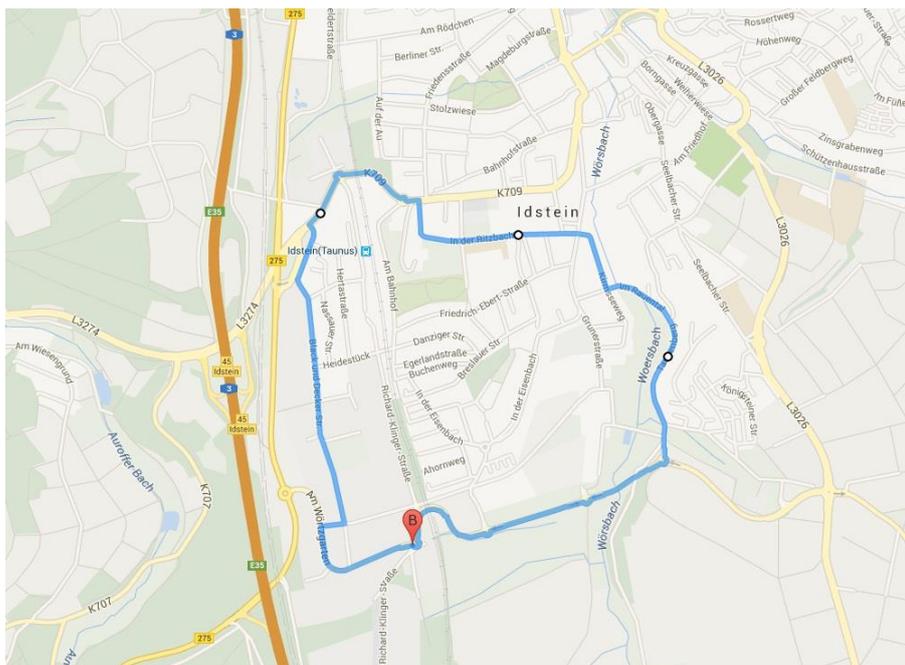


Bild 3: Idstein Stadtkurs

2.2 Auslegung des Überlandfahrabschnittes

Auch bei der Überlandfahrt gibt es einige Faktoren zu beachten. Es ist strikt darauf zu achten, dass in Bereichen die als Überlandfahrt ausgelegt wurden, eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 60-90 km/h seitens der Europäischen Kommission vorgeschrieben ist. Wird die Geschwindigkeit in einigen Streckenabschnitten aufgrund fehlender Geschwindigkeitsbegrenzung oder Unachtsamkeit überschritten, so werden diese zurückgelegten Strecken als Autobahnfahrt gewertet. Fahrten durch geschlossene Ortschaften können und dürfen bei der Überlandfahrt auftreten. Es sei aber nochmals darauf hingewiesen, dass sofern die Geschwindigkeit unter 60 km/h fällt, der Streckenabschnitt mit als Stadtfahrt gewertet wird. Dies geschieht solange bis die Geschwindigkeit wieder innerhalb des geforderten Bereiches von 60-90 km/h liegt. Nun ist es nicht möglich Fahrten durch Ortschaften auf einer Fahrt komplett zu vermeiden, aber man sollte bei der Planung versuchen, die Strecke die infolge von Ortsdurchfahrten entstehen möglichst klein zu halten. So lassen sich die strengen Streckenanteile und Toleranzen einhalten. Ein weiterer nicht zu unterschätzender Faktor ist der Verkehr, insbesondere zu den Stoßzeiten. In Ballungsgebieten kommt es zudem oft vor, dass Landstraßen parallel zur Autobahn, im Falle von Unfällen oder Staus, als Ausweichstrecke genutzt werden. In den Sommermonaten können durch

landwirtschaftliche Fahrzeuge zusätzlich Behinderungen entstehen. Die daraus oft resultierenden Geschwindigkeitseinbrüche unterhalb der 60 km/h müssen dadurch als Stadtanteil gezählt werden, was sich negativ auf die prozentualen Streckenanteile auswirkt. Bild 4 zeigt eine Überlandstrecke, die von dem Stadtkurs in Idstein zu einer Autobahnauffahrt führt. Auf diesem Kurs gibt es in Summe drei kleiner Ortschaften, die durchfahren werden. Für eine erste grobe Auslegung sollen diese jedoch erstmal unberücksichtigt bleiben. Auf der Karte ist erkennbar, dass mehrere Routen zu der Autobahnauffahrt nach Limburg Süd führen. Im Falle der Überschreitung der Streckenanteiltoleranzen kann die Route neu geplant und erprobt werden.

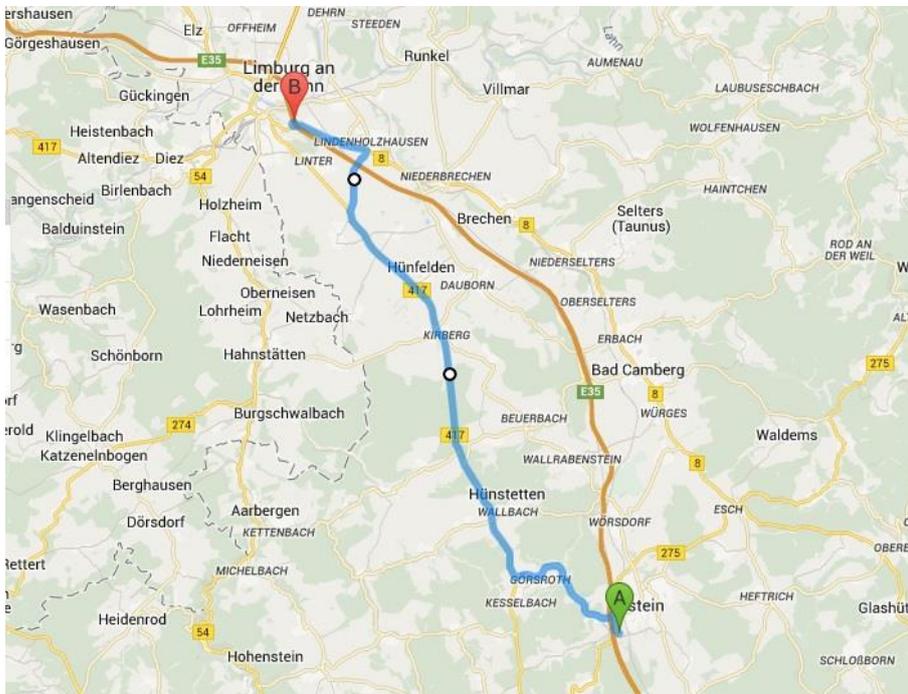


Bild 4: Überlandstrecke des EFZ Idstein

2.3 Auslegung des Autobahnabschnittes

Der Autobahnabschnitt ist meist der unkomplizierteste Streckenabschnitt. Die erforderliche Geschwindigkeit von über 90 km/h sollte überall erreichbar sein. Trotzdem sollte eine Höchstgeschwindigkeit von 145 km/h nicht überschritten werden. Verzögerungen können auf dem Autobahnabschnitt durch Baustellen und Staus entstehen. Baustellen können sich über mehrere Kilometer erstrecken. Ist bekannt, dass sich auf dem geplanten Autobahnabschnitt eine Baustelle befindet, ist zu analysieren, wie stark sie sich auf das Streckenverhältnis auswirkt. Andernfalls sollte die Strecke neu geplant werden. Bild 5 zeigt den Autobahnabschnitt zwischen Limburg Süd und Idstein.

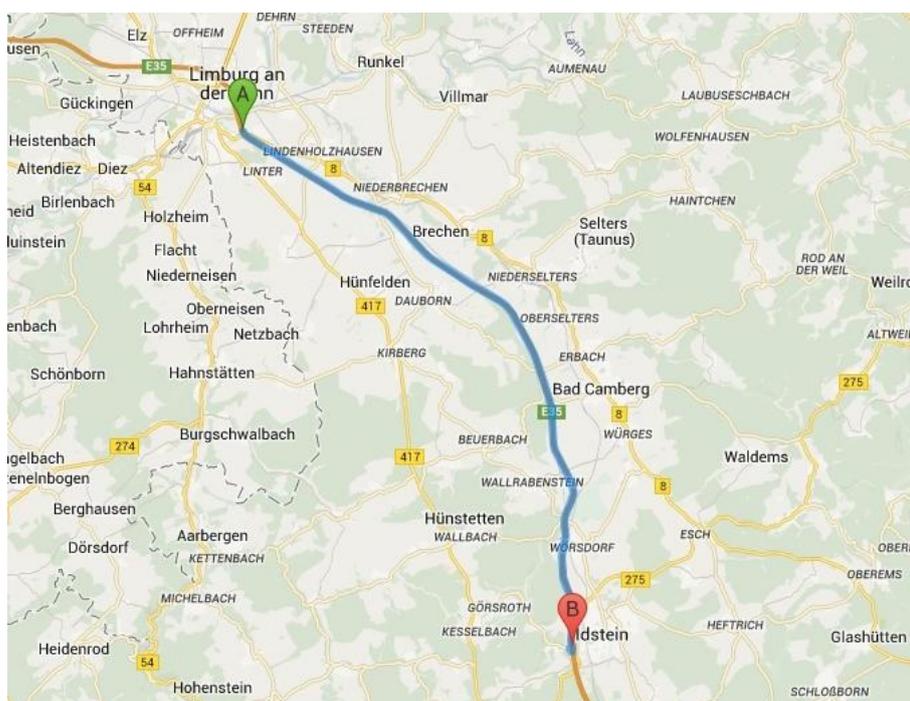


Bild 5: Autobahnstrecke des EFZ Idstein

2.4 Zusammenführen der einzelnen Streckenabschnitte zum Gesamtfahrzyklus

Für die Vorauslegung des RDE-Zyklus setzt man die vordefinierten Streckenabschnitte zusammen.

Tabelle 2: Übersicht der einzelnen Streckenabschnitte

Streckenabschnitt	Dauer	Strecke
Stadt	10 Minuten	4,7 km
Überland	24 Minuten	25,9 km
Autobahn	13 Minuten	24,9 km

In der Tabelle 2 ist ersichtlich, dass der Stadtkurs von Idstein mindestens viermal absolviert werden muss, damit die Mindestanforderung von 16 Kilometer im Stadtanteil eingehalten werden kann. Um eine Dauer von mindestens 90 Minuten im gesamten Zyklus zu erhalten und die Restriktionen bezüglich der prozentualen Streckenaufteilung einzuhalten, sollten es jedoch fünf Runden sein.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Streckenabschnitte als Zyklus

Streckenabschnitt	Dauer	Strecke
Stadt	50 Minuten	23,5 km
Überland	24 Minuten	25,9 km
Autobahn	13 Minuten	24,9 km
Global	87 Minuten	74,3 km

Es ist zu sehen, dass der entworfene Zyklus den gesetzlichen Vorgaben sehr nahe kommt. Die Summe der Fahrzeiten von den einzelnen Streckenabschnitten beträgt momentan ca. 87 Minuten und somit nicht genug, um die erforderliche Mindestdauer von 90 Minuten zu erreichen. Es kommt aber den Vorgaben der europäischen Kommission

sehr nahe. Die gängigen Routenplaner arbeiten oft mit festen Werten für die Geschwindigkeiten um die Reisezeit zu berechnen. Verkehrsbedingte Standzeiten, geringere Fahrgeschwindigkeit und andere Verkehrseinflüsse können die Dauer des Zyklus nochmal in einem gewissen Maße erhöhen. Eine weitere Fehlerquelle bei Routenplaner ist die Streckenlänge. So kann es passieren, dass die angegebenen Strecken des Routenplaners die Topografien nicht korrekt wiedergeben und somit auch die Streckenlänge nicht der tatsächlichen Strecke entspricht.

Aus den Erkenntnissen der Streckenplanung schließt sich eine Phase der Fahrerprobung an, in der der Test iterativ weiter verbessert wird und die Restfehler eliminiert werden. Die PEMS-Anlagen der führenden Hersteller zeigen dazu die momentane Aufteilung der Streckenabschnitte an. Im Bedarfsfall kann so, die Strecke noch während der ersten Erprobungsfahrt optimiert werden.

3 Auswertung und Erprobung des Messzyklus

Nach Erstellung des Zyklus und der ersten Erprobungsfahrt werden die aufgenommenen Messgrößen auf die Einhaltung der gesetzlichen Restriktionen überprüft. Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der im Fahrzeug verbauten Messtechnik sowie der Auswertung von RDE-Entwicklungsfahrzyklen. Zunächst wird jedoch die Messtechnik des Fahrzeuges vorgestellt. Da während aller Messfahrten die Partikelemissionen gemessen wurden, werden die verwendeten Partikelmessgeräte in ihrer Funktionsweise erklärt. Des Weiteren werden verschiedene Auswertemethoden erläutert, darunter auch die von der europäischen Kommission entwickelte Auswertemethodik der „Moving Average Window“. Abschluss dieses Kapitels bildet die vollständige Auswertung des Entwicklungsfahrzyklus „RDE-Idstein“, der auch als Referenz dienen sollen. Die Auswertung erfolgt über ein selbst entwickeltes Excel-Template.

3.1 Vorstellung des Messfahrzeuges und der verbauten Messtechnik

Für die Erprobung des Fahrzyklus und die Untersuchungen dieser Arbeit wurde ein Audi A5 Sportsback, von der Elring/Klinger Motortechnik GmbH, zur Verfügung gestellt. Das Fahrzeug hat das Modelljahr 2015. Der Motor ist ein 2 Liter Vierzylinder Ottomotor mit Direkteinspritzung. Mittels Abgasturboaufladung wird eine maximale Leistung von 165 kW erreicht. Das maximale Drehmoment beträgt 380 Nm [9]. Die Kraftübertragung erfolgt über das „Quattro“-Allradsystem. Der Motor verfügt über 8 Einspritzventile. Vier dieser Einspritzventile sitzen direkt im Brennraum und sind für die Direkteinspritzung verantwortlich, die anderen vier Einspritzventile sitzen im Saugrohr. Auch wenn der Motor über eine Direkteinspritzung verfügt, betreibt man in keinem Bereich des Kennfeldes den motortypischen Schichtladebetrieb. Es wird in allen Betriebspunkten eine Regelung mit Lambda 1 angestrebt. Im Motorsteuergerät ist hinterlegt, ob das Fahrzeug mit sequenzieller Multipoint Saugrohreinspritzung oder mittels Direkteinspritzung betrieben wird [10].

Das Bild 6 zeigt das Fahrzeug mit intern verbauter Messtechnik. Die Vor und Nachteile der Aufbauarten wurde bereits im Abschnitt (1.4) näher erläutert.



Bild 6: Messfahrzeug der ElringKlinger Motorenteknik GmbH Idstein

Das Fahrzeug befand sich zum Zeitpunkt der Messkampagne in einem nahezu seriennahen Zustand. Lediglich die Rückbank des Fahrzeugs musste entfernt werden, damit die erforderliche Messtechnik in das Fahrzeug untergebracht werden konnte. Man versuchte dabei das Gewicht des Fahrzeuges nicht unnötig zu erhöhen, um den gesetzlichen Forderungen gerecht zu werden. Im Messbetrieb beträgt das Gewicht des Fahrzeuges 1820kg. Bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 2120 kg [9] entspricht das einem prozentualen Anteil von 86% des Gesamtgewichtes und ist somit gesetzeskonform. Es sei aber erwähnt, dass es sich bei der verbauten Messtechnik um Prüfstandmesstechnik handelt. Diese wurde aber für die Anforderungen der Straßenmessungen angepasst. Für den Einbau der Messtechnik wurde Wert auf einen qualitativ hochwertigen Aufbau sowie einem strukturierten Kabelmanagement gelegt.

Hintergrund dieser Umbaumaßnahme war es, das Fahrzeug repräsentativ ausstellen zu können. Eines der angestrebten Ziele war es auch die Messtechnik möglichst ohne bleibende Beschädigungen am Fahrzeug wieder ausbauen zu können.

Es wurden für die Straßenmessung folgende zusätzliche Sensoren und Messgeräte im Fahrzeug verbaut:

- Partikelzähler Pegasor Mi2
- Air Supply Pegasor
- Luftmassenmesser VAG
- CuroCon Messbox CuroControl
- 2 weitere Lambdasonden vor und nach GPF TBJ Messtechnik
- 9 Temperatursensoren
- 4 Drucksensoren
- 12 V Li-Ion Batterie MLI Ultra 180Ah Mastervolt
- Ladegerät 12V Batterie Mastervolt
- Spannungswandler 12/24V
- 2 Videocameras
- Kohlenstoffdioxidmelder

Das Bild 7 zeigt Funktionsschema der eingesetzten Messtechnik. Das Herzstück der Datenerfassung ist die CuroControl-M, welches eigens für dieses Fahrzeug konzipiert wurde. Es ist mit ihr möglich, verschiedene Daten via Analog- oder Digitalschnittstellen, als auch über CAN-Bus, aufzuzeichnen. Des Weiteren werden auf der externen Festplatte Videoaufzeichnungen der Messfahrten abgelegt. Die Messdaten der Erprobungsfahrten werden via UMTS oder WLAN auf das Firmennetzwerk übertragen.

Die PEMS wurde ebenfalls über Analoge Schnittstellen an die CuroControl-M angeschlossen und besitzt gemäß den gesetzlichen Vorgaben eine eigene Spannungsversorgung. Die Abgasproben wurden vor Endschalldämpfer, also hinter jeglicher Abgasreinigung entnommen. Diese Entnahmestelle wird als „Tailpipe“ oder „end of pipe“ bezeichnet.



Bild 7: Funktionschema der Messtechnik

3.2 Berechnung des Abgasmassenstromes

Wie im ersten Kapitel beschrieben, müssen die Automobilhersteller bei ihrem Neufahrzeugen wichtige ECU-Daten freigeben, um über den indirekten Weg, den Abgasvolumenstrom berechnen zu können. Auch wenn es sich bei dem Messfahrzeug um ein EU6-Fahrzeug handelt, können relevanten ECU-Kenngrößen, wie etwa „Engine fuel flow“ oder „Engine intake air flow“, nicht ohne weiteres vom CAN-Logger erfasst werden. So war es zwingend erforderlich, für die Bestimmung des Abgasvolumenstromes einen Luftmassenmesser und zusätzliche Lambdasonden zu verbauen.

Anhand der in Kalibrierkurve des Heißfilmluftmassenmessers [Anlage 2] angesteuerten Punkte war es möglich, eine Funktion zu ermitteln, mit der sich der angesaugte Luftmassenstrom berechnen lässt.

Die Funktion ist wie folgt definiert:

$$\dot{m}_{\text{ansaug}} = 2,9153x^4 - 18,67x^3 + 63,325x^2 - 68,446x + 21,228$$

mit

$$x = U_{MAF}$$

Der Spannung der beiden Lambdasonden von TBJ ist wie folgt zu berechnen [11]:

$$U_{\lambda} = (I_p \cdot 1,648 - 2,5) \cdot 1000, U_{\lambda} [V], I_p [mA]$$

Nach umstellen erhält man für den Pumpstrom der Lambdasonde folgende Gleichung:

$$I_p = \frac{\left(\frac{U_{\lambda}}{1000} - 2,5 \right)}{1,648}$$

Wie beim Luftmassenmesser war es möglich, mit Punkten der Kalibrierkurve der Lambdasonden [11] eine Funktion für das Verbrennungsluftverhältnis λ_v wie folgt zu definieren:

$$\lambda_v = 0,02 \cdot I_p^4 + 0,1187 \cdot I_p^3 + 0,2517 \cdot I_p^2 + 0,3593 \cdot I_p + 1,0199$$

Der Kraftstoffmassenstrom ergibt sich somit aus der angesaugten Luftmasse \dot{m}_{Ansaug} und dem Verbrennungsluftverhältnis λ_v mittels der Gleichung:

$$\dot{m}_{\text{Kst}} = \frac{\dot{m}_{\text{ansaug}}}{\lambda_v \cdot L_{\text{min}}} \cdot L_{\text{min}} = 14,5 \frac{\text{kgLuft}}{\text{kgKraftstoff}}$$

für Ottokraftstoff [12]

Der Abgasmassenstrom ergibt sich aus der Summe von angesaugter Luftmasse \dot{m}_{Ansaug} und Kraftstoffmassenstrom \dot{m}_{Kst} .

$$\dot{m}_{\text{Abgas}} = \dot{m}_{\text{ansaug}} + \dot{m}_{\text{Kst}}$$

Der Abgasvolumenstrom \dot{V}_{Abgas} lässt sich wie folgt berechnen:

$$\dot{V}_{\text{Abgas}} = \frac{\dot{m}_{\text{Abgas}}}{\rho_{\text{Abgas}}}$$

Die Dichte des Abgas erhalten wir aus den zusätzlich verbauten Druck und Temperatursensoren und berechnet sich mit Hilfe der Gasgleichung aus:

$$p_{\text{Abgas}} V = m R_{\text{Luft}} T_{\text{Abgas}} \quad ; \quad \frac{p_{\text{Abgas}}}{R_{\text{Luft}} T_{\text{Abgas}}} = \frac{m}{V} = \rho_{\text{Abgas}}$$

$$\text{,mit } R_{\text{Luft}} = 287,058 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

ergibt sich:

$$\dot{V}_{\text{Abgas}} = \frac{\dot{m}_{\text{Abgas}} \cdot R_{\text{Luft}} \cdot T_{\text{Abgas}}}{p_{\text{abgas}}}$$

3.3 Partikelzählverfahren und Berechnung der Emissionen

Die im Vorfeld genannten Formeln zur Berechnung des Abgasmassenstromes sind für die Berechnung aller Emissionen von großer Wichtigkeit. In Rahmen dieser Diplomarbeit wird es aber lediglich die Partikelemissionen gemessen. Des Weiteren wird der Kraftstoffmassenstrom bestimmt, um simultan die Werte für die CO₂-Emissionen zu erhalten.

Es gibt momentan verschiedene Möglichkeiten Partikel zu zählen. Gängige Verfahren sind unter anderem:

- Mikroskopisches Zählverfahren
- Streulichtmethode mit Butanolverdünnung
- Laserbeugung
- Gravimetrisches Zählverfahren
- Auf-Ionisierungsverfahren

Einige dieser Verfahren sind allerdings für den Bereich der Fahrzeugtechnik ungeeignet. Momentan haben sich zwei Messverfahren zur Partikelzählung in diesem Bereich durchgesetzt. Hierbei handelt es sich um das Auf-Ionisierungsverfahren, welches in der Pegasor Mi-Serie Verwendung findet und das Butanolverfahren, welches in dem AVL-APC zur Anwendung kommt.

3.3.1 Funktionsprinzip AVL-APC

Von einer Entnahmestelle in einem Rohr mit konstantem Volumenstrom, CVS-Tunnel genannt, ausgehend gelangen die Abgasproben des Fahrzeuges, beziehungsweise des Motors, in die erste Verdünnungsstufe. Diese besteht aus einer rotierenden Scheibe und einem beheizten Körper mit zwei Anschlüssen. Der erste Anschluss des Rotationsverdünners ist für die Abgasprobe und der zweite Anschluss für die gereinigte Frischluft (Bild 8). Durch die kleinen Löcher innerhalb der rotierenden Scheiben wird die Abgasprobe mit Frischluft verdünnt und durch eine beheizte Leitung in die Evaporation Tube geleitet. Die Verdünnung ist dabei vorrangig abhängig von der

Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe. In der Evaporation Tube wird die Abgasprobe von 150°C auf 350°C erwärmt. Das Zweck der Evaporation Tube ist die Entfernung der volatile Partikel aus den Abgasproben. Die Effizienz der Evaporation Tube muss dabei nach UNECE Regulation 83 mindestens 99% betragen. Vor der eigentlichen Partikelzählung wird die Abgasprobe noch einmal verdünnt. Diese zusätzliche Verdünnungsstufe ist wichtig, um eine Temperatur von unter 35°C am Eingang des Partikelcounters zu erreichen. Wird eine Maximaltemperatur von 35°C am Einlass überschritten, kann dies zur Beschädigung am Partikelcounter führen.

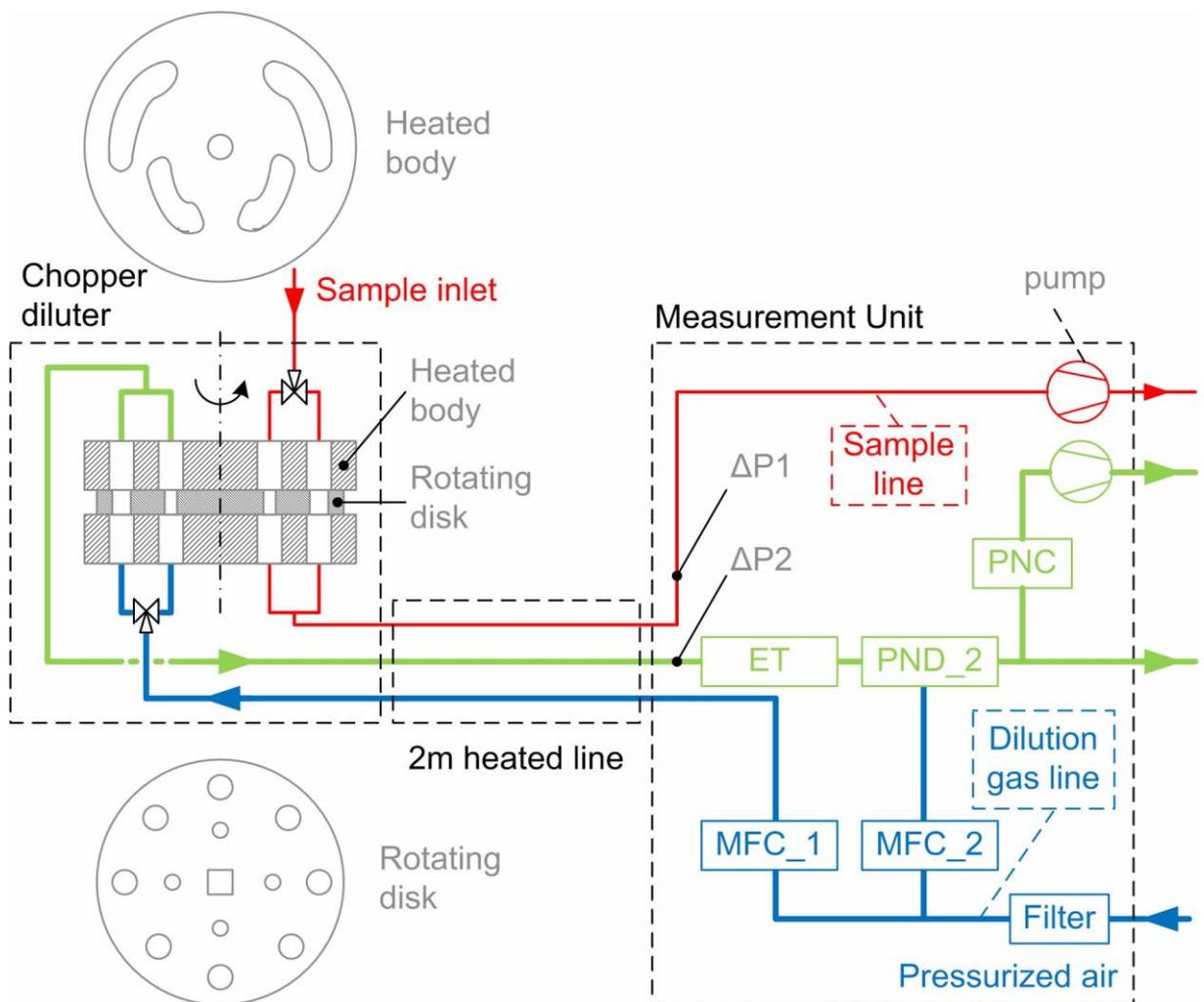


Bild 8: AVL-APC Funktionsprinzip

Die jetzt stark verdünnt Abgasprobe gelangt in den Einlass des Partikelcounters. Hier durchströmen die Proben eine mit Butanol gefüllte Befeuchtungskammer. Im

nachgeschalteten Kondensator werden die vom Butanol befeuchteten Partikel auf 10°C heruntergekühlt. Das Butanol kondensiert an der Oberfläche der Partikel und führt zur Ausbildung einer Butanol-Hülle. Dieses Funktionsprinzip wird als Kondensationkerneffekt bezeichnet. Von dem Kühler werden die Partikel in die Messkammer geleitet. In ihr werden die Partikel mit Hilfe einer Streulichtlinse gezählt [13][14].

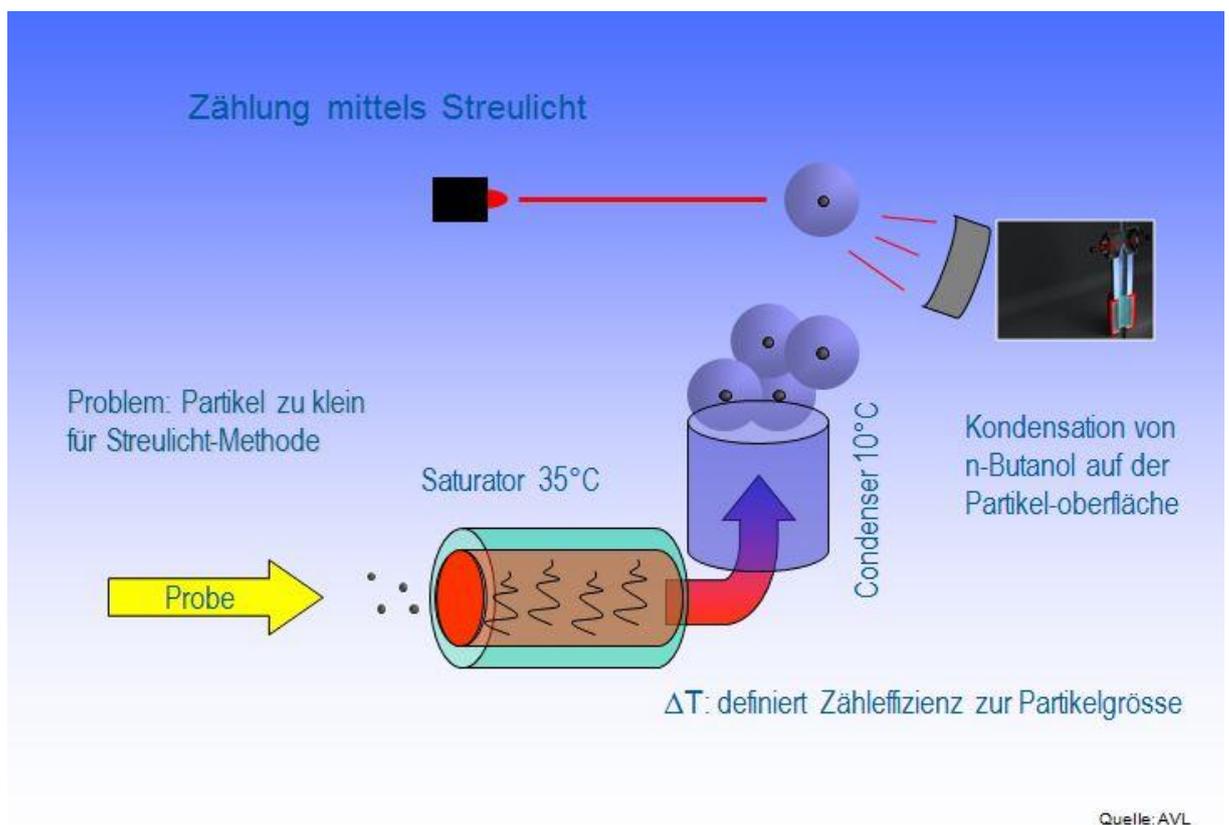


Bild 9: Streulichtverfahren mit Butanolverdünnung

3.3.2 Auf-Ionisierungsverfahren

Die Grundlage für dieses Verfahren bildet das Gaußsche Gesetz der Elektrostatik und Elektrodynamik.

Der in unserem Fall eingesetzte Partikelcounter ist für Analyse der Aerosole unter realen Abgasbedingungen entwickelt worden. Die heiße und unverdünnte Abgasprobe wird durch einen beheizten Schlauch in die Messkammer geleitet.

Dadurch minimieren sich Verlusteffekte infolge der zu geringen Temperatur innerhalb der Probenentnahme. Der Partikelcounter ist mit folgenden Anschlüssen ausgerüstet:

- Probenausgang
- Probeneingang
- Luftzuführung (clean air)
- Netzstrom

Der zugeführte Luftstrom wird an der Corona Nadel komprimiert. Durch die Hochspannung der Corona-Nadel wird der Luftstrom ionisiert. Der Saugstrom transportiert derweil das Aerosol in die Messkammer. Die ionisierte Luft und das Aerosol mischen sich vor dem Injektor. Bei der Durchmischung kommt es zur elektrostatischen Aufladung der Partikeloberflächen. Die Ionen Falle erzeugt ein elektrisches Feld, welches die überschüssige Ladung aus der zugeführten Luft entfernt. Die elektrostatisch geladen Partikel werden beim Verlassen der Messkammer als Strom erfasst. Die Partikelemission richtet sich dabei nach der Höhe dieses Stromes [15][16].

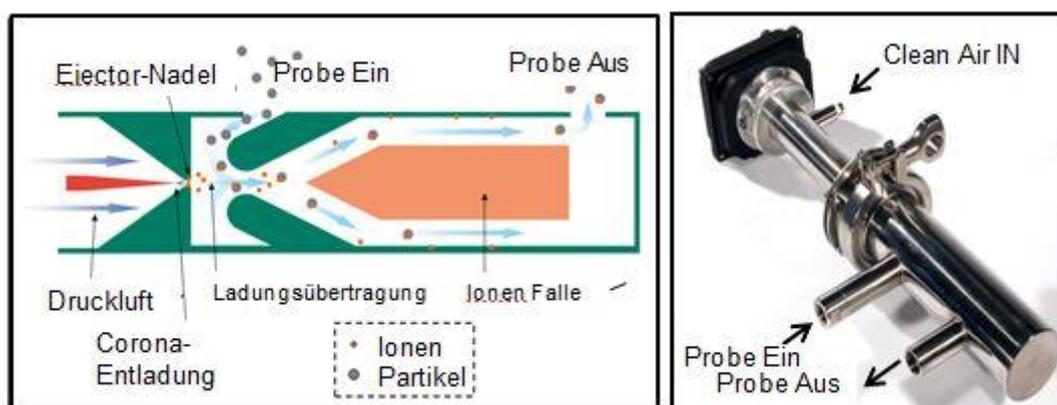


Bild 10: Auf-Ionisierungsverfahren

Im aktuellen Gesetzesentwurf wurde von Gesetzgeber noch nicht entschieden, welches Partikelzählverfahren für die RDE-Zertifizierungsmessungen eingesetzt werden darf. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass sich beide Messverfahren etablieren könnten [5].

3.3.3 Berechnung der Partikel Emissionen

Der Pegasor Mi2 gibt die Werte für die Partikelanzahl in $10^3/\text{cm}^3$ aus. Um diesen Wert auf die gefahrene Strecke umrechnen zu können, brauchen wir wie in Absatz 3.2 beschrieben den Abgasvolumenstrom. Mit dem Abgasvolumenstrom und die vom Partikelcounter ermittelte Partikelanzahl, ergibt sich der momentane Partikel ausstoß zu:

$$\frac{\text{PN}}{\text{s}} = \dot{V}_{\text{Abgas}} \cdot \text{PN}_{\text{Pegasor}} = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{\text{PN}}{\text{m}^3} \right]$$

Der momentanen Partikel ausstöße wird auf Basis der Zeit angegeben und lässt sich kumulieren. Bild 11 zeigt im oberen Bereich den momentanen Partikel ausstöße, während im unteren Bereich die aufsummierten Werte bzw. kumulierte Werte dargestellt wurden.

Mit den kumulierten Werten der Partikelemission und der während der Messfahrt zurückgelegten Strecke lassen sich die ausgestoßenen Partikel auf die gefahrene Strecke berechnen. Die momentan zurückgelegte Strecke berechnet sich trivial aus:

$$s = \Delta v \cdot \Delta t$$

Der Quotient aus den kumulierten Partikeln PN_{cum} und der zurückgelegter Strecke s ergibt sich somit aus.

$$\frac{\text{PN}}{\text{km}} = \frac{\text{PN}_{\text{cum}}}{s}$$

3.3.4 Vergleich der Partikelzählverfahren

Auf dem Rollenprüfstand war es möglich beide Partikelzählverfahren einmal zu vergleichen. Hierzu wurde der RDE Idstein Entwicklungsfahrzyklus auf dem Rollenprüfstand übertragen. Die Entnahme der Abgasproben erfolgte „end of pipe“. Während der Rollenprüfstandsmessung wurden beide Partikelzählssysteme simultan betrieben.

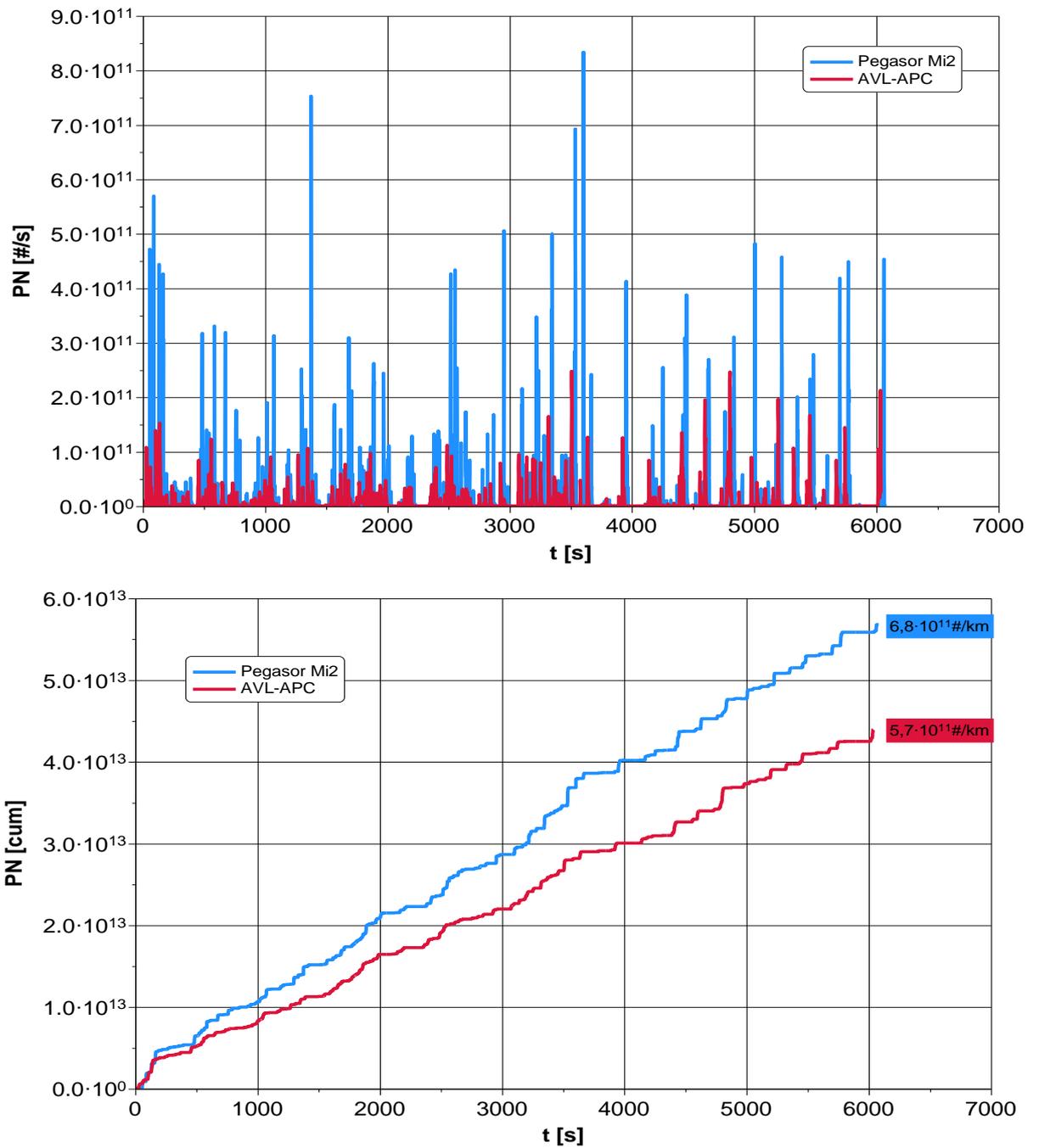


Bild 11: Vergleich von AVL-APC und Pegasor Mi2

Es ist zu sehen, dass der Pegasor Mi2 deutlich höhere Peaks aufweist als das AVL-APC. Mit $6,8 \cdot 10^{11}$ Partikel pro gefahrenem Kilometer hat der Pegasor Mi2 fast 20% mehr Partikel erfasst als das AVL-APC. Dieser Vergleich soll verdeutlichen wie sehr sich die Partikelzählverfahren voneinander unterscheiden. Ohne gesetzliche Regelungen in

denen die Partikelzählverfahren genau definiert werden, wird es bezüglich der zu erreichenden Ergebnisse oft mehr oder minder starke Abweichungen geben.

3.4 Auswertemethoden

3.4.1 Dynamische Auswertung von RDE-Fahrten

Einer der größten Einflüsse auf eine Messfahrt hat der Fahrer. Aus diesem Grund hat die ACEA sich schon früh darum bemüht, dass Restriktionen im Bereich der Fahrdynamik in die Gesetzgebung mit aufgenommen werden. Um die Fahrdynamik bewerten zu können, wurde ein Modell entwickelt, bei der das Produkt aus Geschwindigkeit und Beschleunigung nach ihrer Häufigkeit geordnet werden. Zusätzlich wird das 95. Perzentil berechnet. Das Ergebnis der dynamischen Auswertung stellt beispielhaft das folgende Bild dar:

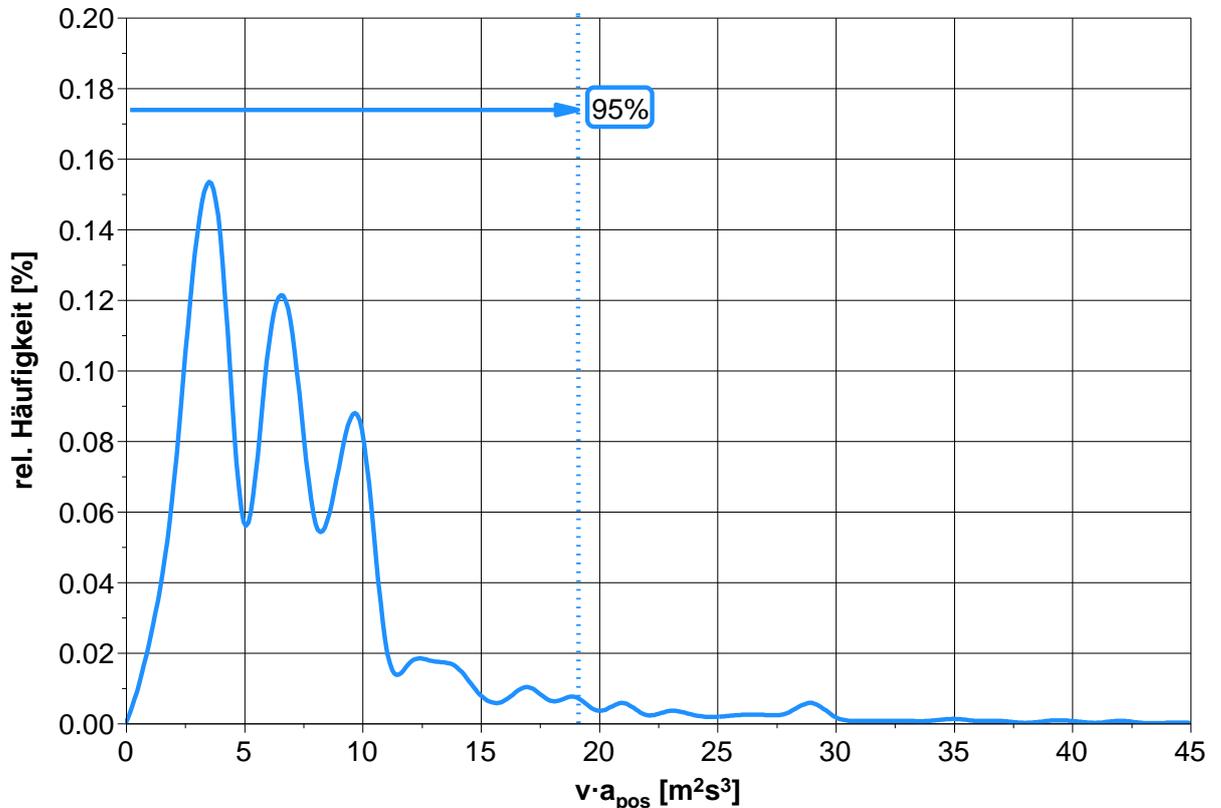


Bild 12: Häufigkeitsverteilung der Trip-Dynamik

Auf die Abszisse des Diagrammes werden die Produkte von Beschleunigung und Geschwindigkeit aufgetragen und auf der Ordinate die relativen Häufigkeiten. Das 95. Percentil gibt an, bei welchem Wert an der Abszisse 95 Prozent aller „Beschleunigungen“ geschehen sind. Dieser Wert $a_{pos} \cdot v$ wird die Messfahrt in ihrer Dynamik charakterisieren. Ein geringer Wert wird dabei bei ruhigen Fahrten mit feinfühligter Beschleunigung erreicht. Hohe Werte hingegen sind charakteristisch für eine aggressive Fahrweise und starke Beschleunigungen.

Für die Erstellung des Diagrammes wird die momentanen Beschleunigungen a_i des Fahrzeugs wie folgt berechnet:

$$a_i = \frac{(v_{i+1} - v_{i-1})}{2 \cdot 3,6}$$

Im Anschluss werden diese mit den momentanen Geschwindigkeiten multipliziert.

$$(a \cdot v)_i = \frac{a_i \cdot v_i}{3,6} ; v_i [km/h], a [m/s^2]_i$$

Die daraus entstehenden Werte $(a \cdot v)_i$ beinhalten alle positiven, als auch negativen Werte. Im Bild 12 ist jedoch ersichtlich, dass die Häufigkeitsverteilung lediglich nur die positiven Werte beinhaltet. Deshalb werden die negativen Werte aussortiert. Das 95. Percentil $(a_{pos} \cdot v)[95]$ lässt sich nun auf mehrere Arten bestimmen. Zum einen kann man mit Hilfe von „Excel“, die Werte durch die Funktion „Häufigkeit“ einer Klasse zuordnen lassen. Die Klasseneinteilung sollte dabei ganzzahlig sein. Durch die Anzahl der Werte in den jeweiligen Klassen n_{kl} und die Summe aller Werte n_{ges} lässt sich die relative Häufigkeit n_{rel} wie folgt berechnen.

$$n_{rel} = \frac{n_{kl}}{n_{ges}} \cdot 100\%$$

Summiert man die relativen Häufigkeiten, ist das 95 Percentil $(a_{pos} \cdot v)[95]$, der Wert $(a_{pos} \cdot v)$, bei dem die Summe 95% steht. Sollte die 95% zwischen zwei Klassen liegen, kann mit Hilfe von linearer Interpolation das 95 Percentil berechnet werden.

Bei der zweiten Möglichkeit sortiert man die Werte $(a_{pos} \cdot v)$ zuerst in aufsteigender Reihenfolge. Die niedrigste Wert $(a_{pos} \cdot v)$ erhält dann den Wert $1/n_{ges}$, wobei n_{ges} für die Anzahl aller $(a_{pos} \cdot v)$ steht. Der nächste Wert $(a_{pos} \cdot v)$ erhält den Wert $2/n_{ges}$. Das führt sich immer weiter fort bis zum letzten und höchsten Wert $(a_{pos} \cdot v)$, welcher dann Wert n_{ges}/n_{ges} . Das 95 Percentil $(a_{pos} \cdot v)[95]$ ist dann der Wert bei dem $i/n_{ges} = 0,95$. Sollte kein exakter Wert für das 95 Percentil $(a_{pos} \cdot v)[95]$ durch die Aufteilung gegeben sein, sollte hier wieder mit Hilfe der linearen Interpolation zwischen den Werten $i/n_{ges} < 0,95$ und $i+1/n_{ges} > 0,95$ Das 95 Percentil $(a_{pos} \cdot v)[95]$ berechnen.

In der 48.ten Sitzung des „Technical Committee – Motor Vehicle“ wurde zudem folgende Grenzen für das 95 Percentil $(a_{pos} \cdot v)[95]$ in den einzelnen Phasen der Messfahrt vorgeschlagen [5]:

Während der Stadtfahrt und Überlandfahrt:

$$\overline{v_{St,Üb}} \leq 74,6 \text{ km/h} \quad \text{und}$$

$$(v \cdot a_{pos})_k [95] > (0,1961 \cdot \overline{v_{St,Üb}} + 9,8725)$$

Sowie während der Überlandfahrt und Autobahnfahrt

$$\overline{v_{Üb,BAB}} > 74,6 \text{ km/h} \quad \text{und}$$

$$(v \cdot a_{pos})_k [95] > (0,0742 \cdot \overline{v_{Üb,BAB}} + 18,966)$$

3.4.2 Moving Average Window

Ein weiteres Kriterium zur gesetzeskonformen Auswertung ist das Analyse der CO₂-Emissionen über die Moving Average Window Methode. Das Verfahren wurde der JRC entwickelt. Das dazugehörige Auswertetool ist ein freiverfügbares „Excel Addin“ und trägt den Namen „EMROAD“. Um das Verfahren anwenden zu können, werden die Daten der CO₂-Emissionen des Fahrzeugs von WLTC benötigt. Diese Auswertemethodik lässt sich für die andere Abgasemissionen ebenfalls verwenden.

3.4.2.1 Erstellung der CO₂-Kennlinie

Die CO₂-Kennlinie wird in einem kartesischen Koordinatensystem eingetragen. Auf der Abszisse werden die Geschwindigkeiten von 0-145 km/h aufgetragen und auf der Ordinate die Masse der CO₂-Emissionen. Beschrieben wird die Kennlinie durch drei markante Punkte. Der erste Punkt P₁ wird definiert, als Masse der CO₂-Emissionen während der Low-Speed-Phase, $\overline{v_{P1}} = 19 \text{ km/h}$, Phase 1; des WLTP multipliziert mit dem Faktor 1,2.

$$P_1 = M_{\text{CO}_2\text{LowSpeed}} \cdot 1,2$$

Der Punkt P₂ wird definiert, als Masse der CO₂-Emissionen während der High-Speed-Phase, $\overline{v_{P2}} = 56,6 \text{ km/h}$, Phase 3; des WLTP multipliziert mit dem Faktor 1,1.

$$P_2 = M_{\text{CO}_2\text{HighSpeed}} \cdot 1,1$$

Der Punkt P₃ wird definiert, als Masse der CO₂-Emissionen während der Extra High-Speed-Phase, $\overline{v_{P3}} = 92,3 \text{ km/h}$, Phase 4; des WLTP multipliziert mit dem Faktor 1,05.

$$P_3 = M_{\text{CO}_2\text{ExtraHighSpeed}} \cdot 1,05$$

Anhand dieser Referenzpunkte lässt sich die CO₂-Kennlinie durch Linearisierung der Punkte P₁ und P₂, sowie P₂ und P₃ beschreiben. [3, S.66f]

Zusätzlich zu der CO₂-Kennlinie werden Toleranzbänder in das Diagramm eingezeichnet. Es sind hierfür 2 Toleranzklassen vorgesehen. Die erste Toleranzklasse entspricht $tol_1 = 25\%$, die zweite Toleranzklasse $tol_2 = 50\%$. Die Toleranzen werden sowohl oberhalb als auch unterhalb der CO₂-Kennlinie aufgetragen. (siehe Bild 13)

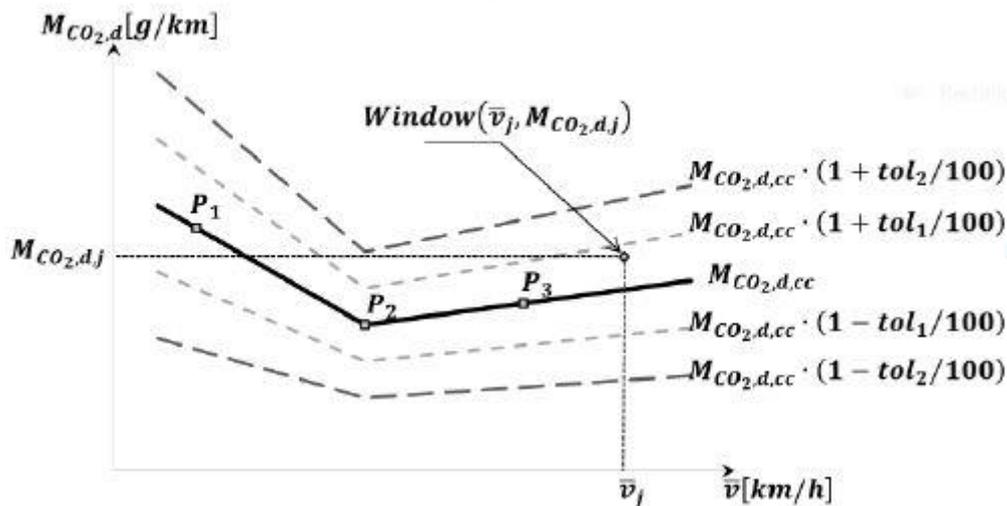


Bild 13: CO₂-Kennlinie mit Toleranzbändern [1, S.68]

3.4.2.2 Einteilung der Fenster und Berechnung der gleitenden Mittelwerte.

Um die Erstellung der Berechnungsfenster vorzunehmen, werden die kumulierten CO₂-Emissionen während der RDE-Messfahrt benötigt, sowie die Geschwindigkeiten. Zusätzlich benötigt man eine Referenzmasse der CO₂-Emissionen. Diese errechnet sich wie folgt:

$$M_{CO_2,ref} = \frac{M_{CO_2,WLTP}}{2}$$

Bei der Einteilung der Berechnungsfenster sind 2 Varianten möglich. Entweder man beginnt, bei der Berechnung der Fenster, am Anfang der kumulierten CO₂-Emissionen oder an deren Ende. In diesem Abschnitt werden wir am Ende der kumulierten Emission mit der Erstellung der Fenster beginnen. (Bild 14)

Man beginnt damit die CO₂-Emissionen der RDE-Messfahrt am Ende der Verlaufslineie bis zu einen gewissen Punkt in Richtung Beginn der Messung, in einem Fenster zu bringen. Die in diesem Fenster ausgestoßenen Masse an CO₂-Emissionen muss genauso groß sei, wie die Referenzmasse der WLTP CO₂-Emissionen.

$$M_{\text{CO}_2\text{t,Start}} - M_{\text{CO}_2\text{t,i}} = M_{\text{CO}_2\text{ref}}$$

Die Breite der Fenster ist also bestimmt durch die Referenzmasse der CO₂-Emissionen und der während Messfahrt ausgestoßenen CO₂-Emissionen. In diesem Fenster wurde eine Zeitspanne durchschritten, welche Geschwindigkeiten und CO₂-Emissionen der RDE-Messfahrten enthalten. In nächsten Schritt werden die Mittelwerte der Geschwindigkeiten

$$\overline{v_{\text{Fi}}} = \frac{\sum v_{\text{Fi}}}{\Delta t}$$

und der CO₂-Emissionen

$$\overline{M_{\text{CO}_2\text{Fi}}} = \frac{\sum M_{\text{CO}_2\text{Fi}}}{\Delta t}$$

berechnet.

Die berechneten Werte ergeben die Koordinaten eines Punktes, welchen man in das Diagramm (Bild 15) eintragen kann.

Für die Berechnung des nächsten Fensters, und damit verbunden dem nächsten Punkt im Diagramm, verschiebt man seinen Startpunkt um 1 Sekunde in Richtung Anfang der Messung. Es sollte dann folgende folgende Bedingung erfüllt sein.

$$M_{(\text{CO}_2\text{t,Start-1s})} - M_{\text{CO}_2\text{t,j}} = M_{\text{CO}_2\text{ref}}$$

Es ergibt sich ebenfalls wieder eine Fensterbreite die eine Zeitspanne durchschreiten. Die Fensterbreiten hängen wie bereits erwähnt von unserer Referenzmasse und der

ausgestoßenen CO₂-Masse des Fahrzeuges während der Straßenmessung ab. Es ist also ersichtlich, dass der Anstieg der kumulierten CO₂-Masse der RDE-Messfahrt ausschlaggebend für die Breite der Fenster ist.

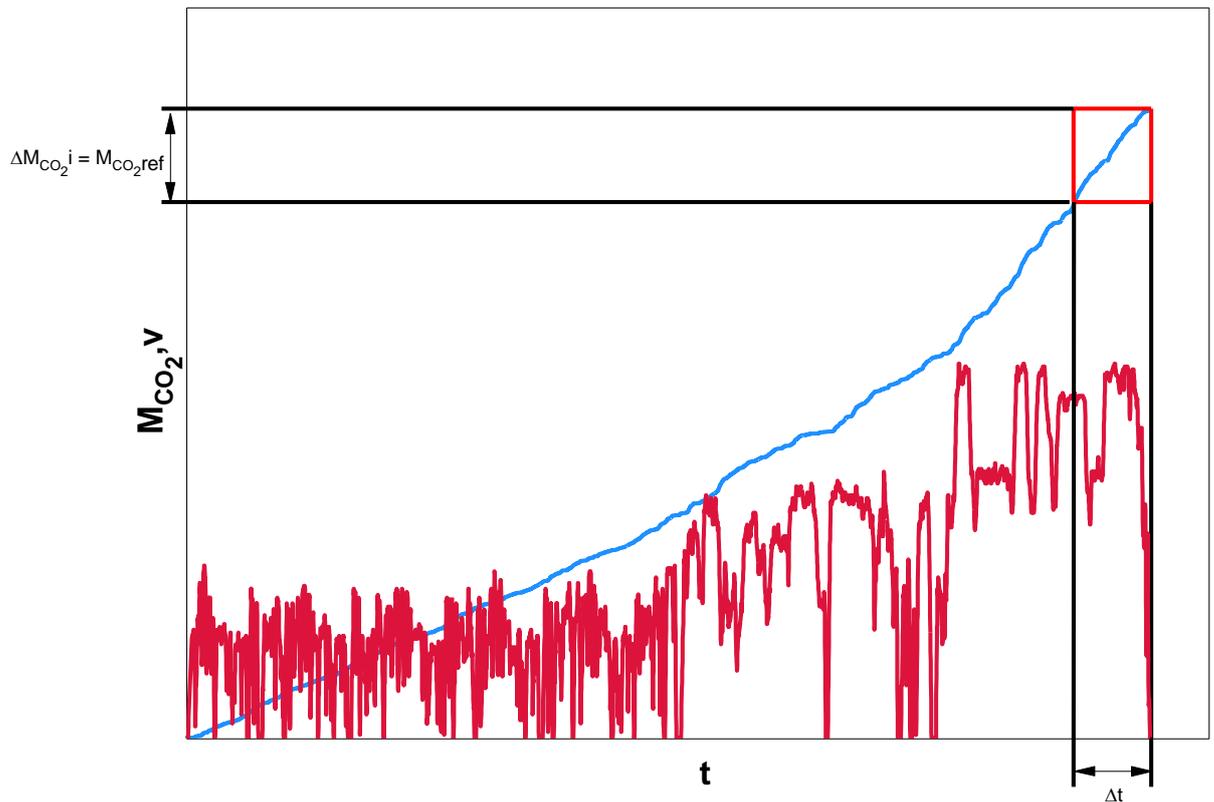


Bild 14: Erstellen der Fenster für MAW-Methode

3.4.2.3 Gesetzliche Vorgaben der MAW-Methode

Die in das Diagramm eingetragenen Punkte werden ebenfalls der Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt zugeordnet. Nur werden die Geschwindigkeitsbereiche im Vergleich zu den RDE-Messfahrten anders definiert. So fallen alle Punkte mit einer Geschwindigkeit unter 45 km/h in den Stadtbereich, alle Punkte mit einer Geschwindigkeit größer als 45 km/h und kleiner als 80 km/h in den Überlandbereich und alle Punkte mit einer Geschwindigkeit größer als 80 km/h und kleiner als 145 km/h in den Autobahnbereich. [3,S.68]

Die RDE-Messfahrt gilt als bestanden, wenn sich jeweils wenigsten 15% der Punkte in den Bereichen Stadt, Überland und Autobahn befinden.

Des Weiteren sollen mindestens 50% der Stadt, Überland und Autobahnfenster in der ersten Toleranzklasse von 25% liegen. Wenn die Anforderung von 50% nicht erreicht werden, kann die erste Toleranzklasse von 25% um jeweils 1% auf nicht mehr als 30% erhöht werden.

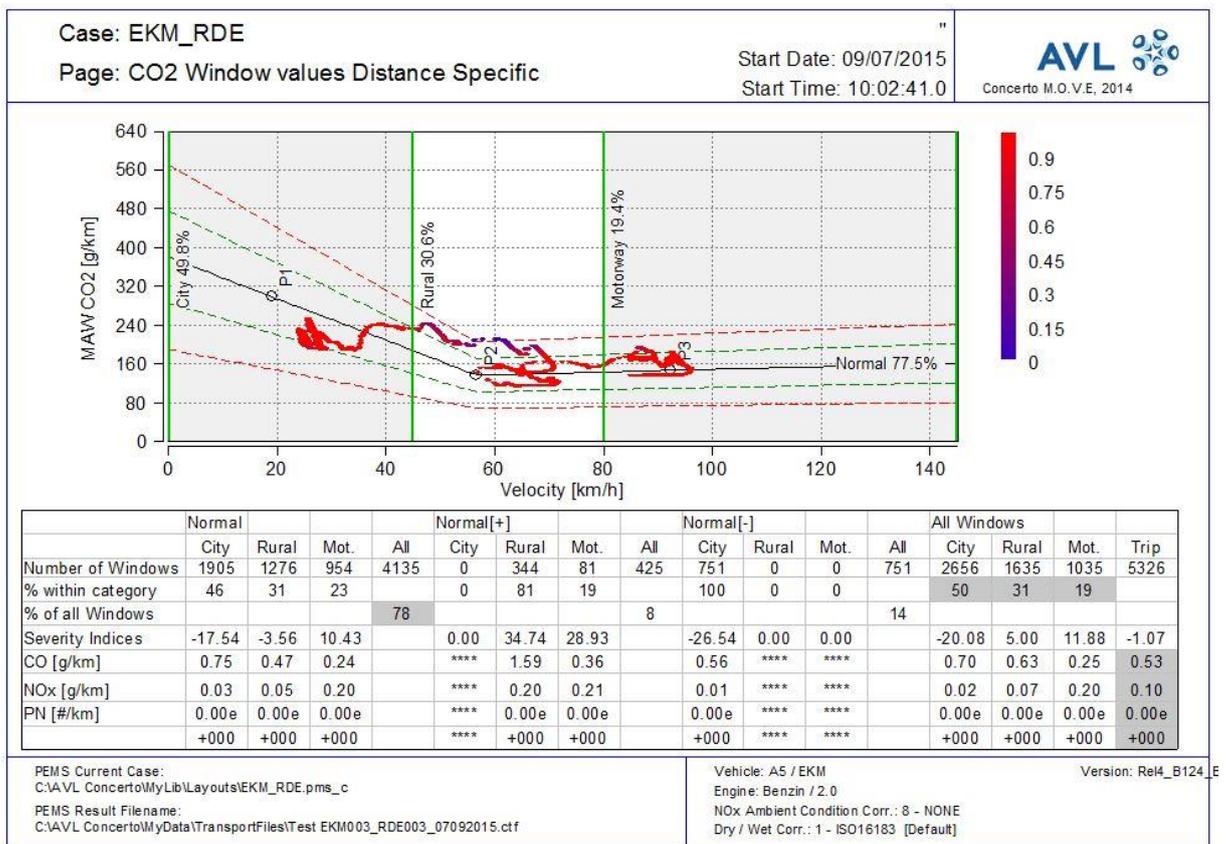


Bild 15: Auswertung der MAW-Methode mit AVL Concerto

3.4.3 Verweildaueranalyse

Zusätzlich wurde zu jeder Fahrt ein Verweildauerkennfeld erstellt um aufzuzeigen in welchen Bereichen des Kennfeldes sich die jeweiligen Testfahrten bewegen. Hierzu wurden für jede Testsekunde die Motordrehzahl/Drehmoment-Werte als Punktediagramm dargestellt.

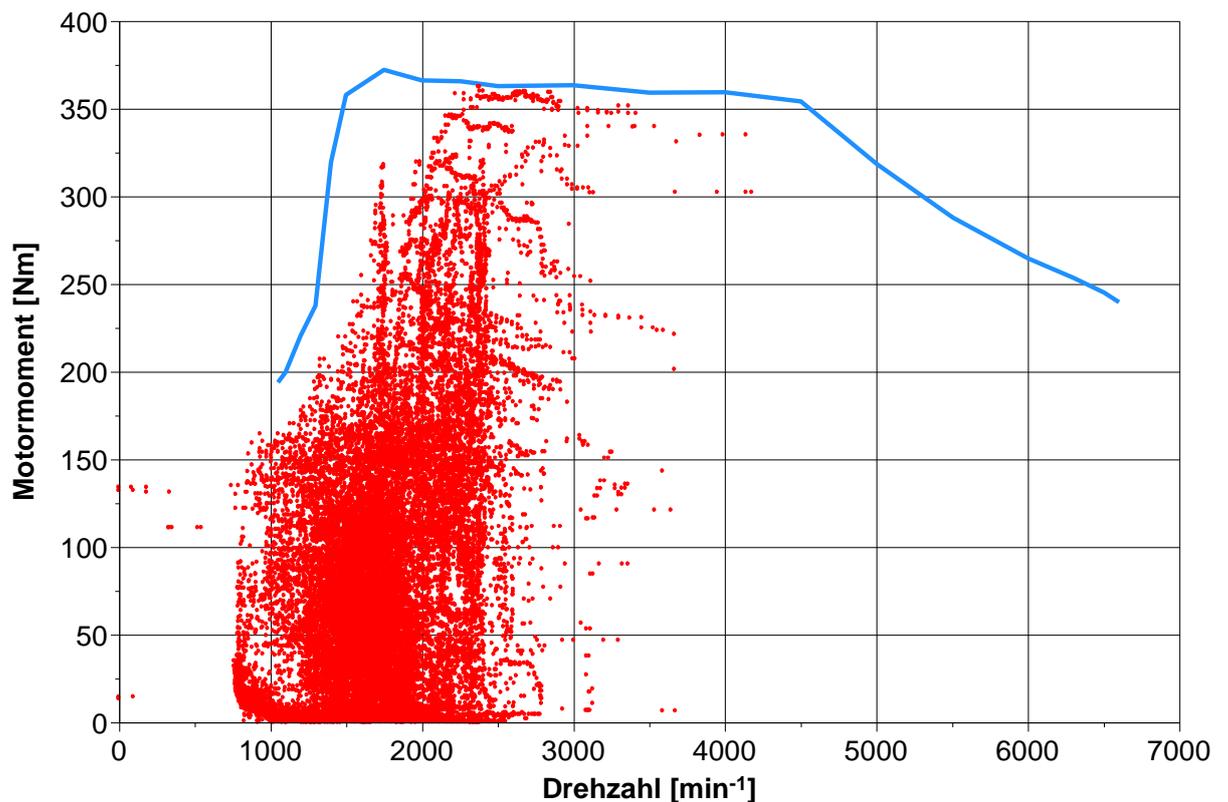


Bild 16: Aufenthalt im Motorkennfeld

Das Problem des Punkte-Diagrammes ist allerdings, dass sich Punkte überdecken können und dadurch keinerlei Aussagen über die relative Verteilung der Punkte getroffen werden können. Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine Verbundklassifizierung für die Verweildaueranalyse erstellt. Bei dieser Art des Diagrammes werden alle Punkte die in dem jeweiligen Quadrat liegen zusammengezählt. Über die Gesamtanzahl der Punkte kann die relative Verweildauer in den einzelnen Quadraten ermittelt werden. Im Bild 17 ist zu sehen, dass je intensiver die Rotfärbung wird, desto länger der Aufenthalt im jeweiligen Quadrat ist.

Nach der Eingabe, der während der Fahrt gesammelten Daten, erstellt Excel ein Auswertungsfenster, welches die für die Erprobung wichtigsten gesetzlichen Randbedingungen zusammenfasst.

Auswertung				
Stadt				
Verstrichene Zeit [min]	57,80		Verbrauch Stadt [l/100km]	11,5
zur. Strecke [km]	28,72	min. 16 km	Summe Partikel Stadtfahrt	5,9E+13
Standzeit [s]	352	346,77	Partikelanzahl/km Stadt	2,1E+12
Durch.-geschwindigkeit [km/h]	28,69	15...30 km/h	CO ₂ Emission Stadt [g/km]	264,9
Überland				
Verstrichene Zeit [min]	22,8		Verbrauch Überland [l/100km]	7,8
zur. Strecke [km]	29,65	min. 16 km	Summe Partikel Überlandfahrt	4,5E+13
			Partikelanzahl/km Überland	1,52E+12
			CO ₂ Emission Überland [g/km]	178,8
Autobahn				
Verstrichene Zeit [min]	13,02		Verbrauch Autobahn [l/100km]	10,1
zur. Strecke [km]	26,24	min. 16 km	Summe Partikel Autobahn	2,5E+13
max. Geschwindigkeit	145	145 km/h +15km/h	Partikelanzahl/km Autobahn	9,7E+11
Zeit mit Geschwindigkeit >100km/h [s]	638,7	300	CO ₂ Emission Autobahn [g/km]	232,5
Zeit mit Geschwindigkeit >145km/h [s]	0	160km/h für 3%		
Global				
Verstrichene Zeit [min]	93,6	90...120min	PN [# /km]	1,53E+12
zur. Strecke [km]	84,6		PM [mg/km]	0,4
Durch.-geschwindigkeit [km/h]	54,2		CO ₂ Emission [g/km]	243,3
Streckenanteil Stadtfahrt	33,9%		CO Emission [g/km]	
Streckenanteil Überlandfahrt	35,0%	100,0%	Nox Emissionen [mg/km]	
Streckenanteil Autobahnfahrt	31,0%	±10 %	benötigter CF-Wert für PN nach EU6	2,6
Zeitanteil Stadtfahrt	61,7%		benötigter CF-Wert für PM nach EU6	0,09
Zeitanteil Landfahrt	24,4%		benötigter CF-Wert für CO nach EU6	
Zeitanteil Autobahnfahrt	13,9%		benötigter CF-Wert für NOx nach EU6	
			Streckenverbrauch [l]	8,2
			Durchschnittsverbrauch [l/100 km]	9,7

Bild 18: Zusammenfassung der Auswertung

Das Auswertungsfenster wurde in 4 Sektoren eingeteilt, welchen den jeweiligen Abschnitten „Stadt“, „Überland“, „Autobahn“ zugeordnet sind. Zusätzlich wird im Sektor „Global“ die gesamte Fahrt ausgewertet. Die Unterteilung erfolgte aus dem Grund, dass, wie in Kapitel 2 und 3 beschrieben, unterschiedliche Randbedingungen in den Streckenabschnitten eingehalten werden müssen. Um die Überprüfung der Restriktionen zu vereinfachen, färben sich die geprüften Randbedingungen bei Einhaltung der Kriterien grün ein. In der Mitte des Auswertefensters stehen zudem noch die Mindestanforderungen die es zu erfüllen gilt. Ein gutes Beispiel dafür ist die Standzeit. Die Standzeit während des Stadtabschnittes soll, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, mindestens 10% betragen. Durch eine hinterlegte Formel wird die Mindeststandzeit berechnet und beträgt in diesem Fall 347 Sekunden. Die Standzeit betrug 352 Sekunden und färbt sich somit grün. Zusätzlich dazu werden in jedem

Abschnitt noch der Durchschnittsverbrauch, die Partikelanzahl je Kilometer und die CO₂-Emissionen aufgelistet. Die CO₂-Emissionen wurden nach [12] berechnet. Im Ausschnitt „Global“ sind neben der gesetzlich relevanten Aufteilung der Streckenanteile, noch leere Zeilen für die CO-Emissionen und die NO_x-Emissionen aufgelistet. Das Template wurde somit bereits für eine Nutzung von Gas-PEMS-Geräten angepasst. Ein weiterer wichtiger Punkt der Auswertung sind die Konformitätsfaktoren (CF-Werte), welche noch diskutiert werden. Dieses Template errechnet dementsprechend nur erforderliche CF-Werte. Auf unserer Referenzmessfahrt im Idsteiner Land wurde insgesamt eine Partikelanzahl von $1,28 \cdot 10^{14}$ erreicht. Das entspricht einem Wert von $1,53 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer. Nach den Grenzwerten der Euro 6c Abgasnorm [1] von $6 \cdot 10^{11}$ Partikel je gefahrenen Kilometer entspricht das einem CF-Wert von 2,6.

Ein weiterer Schritt der Auswertung ist die Analyse der Partikelemissionen. Hierzu wurde jeweils ein Diagramm erstellt, indem der momentane Partikelausstoß, sowie die kumulierte Partikelanzahl, zusammen mit der Geschwindigkeit, über der Zeit aufgetragen wurden (siehe Bild 19). Mit Hilfe dieser Diagramme sollen hohe Peaks einerseits erkannt, andererseits auch einem Event zugeordnet werden. Diese hohen Peaks lassen häufig auf folgen Ursachen zurückführen:

- Kaltstart
- Beschleunigungen, vor allem unter andauernder hoher Last
- Schubbetrieb
- Fahrdynamik

Die erhöhten Ausschläge sind eher typisch für die Stadt und Überlandabschnitte. Typisch für die Autobahnfahrt ist die erhöhte Basis des Partikelausstoßes. In der Regel tendierte der Partikelausstoß, in der Stadt und bei der Überlandfahrt, bei konstanter Fahrt gegen „Null“. Auf der Autobahn hingegen steigt der Partikelausstoß bei konstanter Fahrt merklich an und führt so zur Erhöhung der Basis.

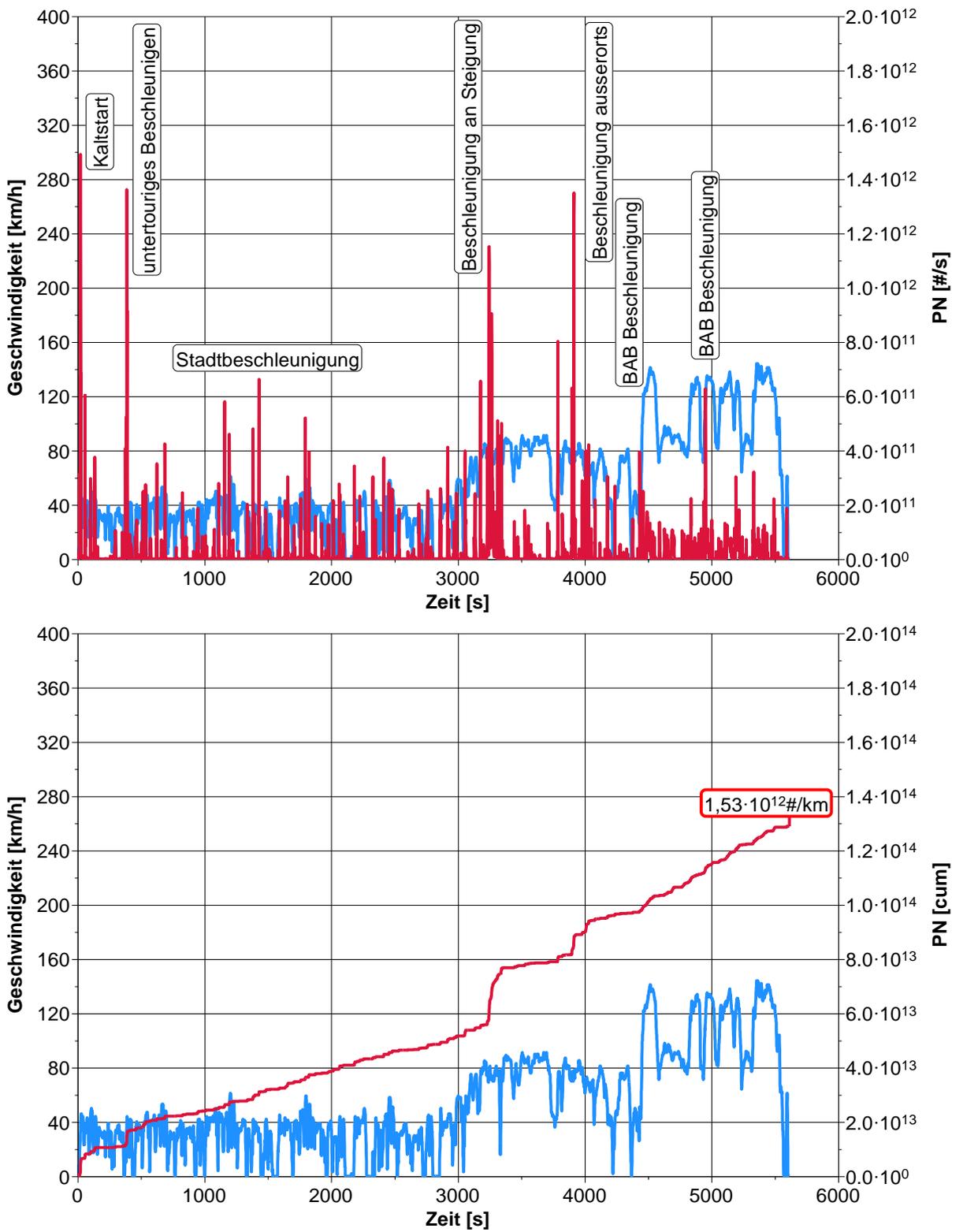


Bild 19: Partikelemission RDE Idstein

Bei der Vielzahl der Messfahrten ist aufgefallen, dass sich die Partikelemissionen je nach Beschleunigung stark unterscheiden. Um diesen Unterschied aufzuzeigen, wurden drei charakteristische Beschleunigungen während des Fahrzyklus näher untersucht. Die Beschleunigungen lassen sich wie folgt benennen:

- Stadtbeschleunigung
- Volllastbeschleunigung
- Hochdrehzahlbeschleunigung

Diese drei Beschleunigungen stehen sinnbildlich für die charakteristischen Beschleunigungen in den jeweiligen Streckenabschnitten. Die Stadtbeschleunigung tritt vorrangig im urbanen Gebieten auf, beschleunigt wird das Fahrzeug hierbei aus dem Stillstand heraus. Das Drehzahlband wird aufgrund der niedrigen Gangstufen schnell durchschritten bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h. Die Volllastbeschleunigung tritt vorrangig im ländlichen Gebieten auf. Sie ist geprägt von relativ hohen Lasten, bei niedrigen Drehzahlen. Das Beschleunigungsvermögen ist dabei von allen Beschleunigungen am geringsten. Die Hochdrehzahlbeschleunigung ist definiert durch hohe Beschleunigungen bei hohen Drehzahlen und hohen Lasten. Sie wird vorrangig auf der Autobahn oder bei einer aggressiven Fahrweise erreicht.

Diese Beschleunigungen lassen sich durch ihre Charakterisierung reproduzieren. Das Bild 20 zeigt die kumulierte Partikelanzahl der unterschiedlichen Beschleunigungen. Die Lastbeschleunigung erzeugte bei diesem Vergleich oft die höchsten Partikelemissionen. Hingegen erreichten die Stadt- und Hochdrehzahlbeschleunigungen oft nur die Hälfte des Wertes. Erkennbar ist dies auch im Bild 19. Abgesehen von dem Kaltstart sind die Partikelemissionen der Stadtbeschleunigungen oft niedriger als die Beschleunigungen die Außerorts absolviert werden.

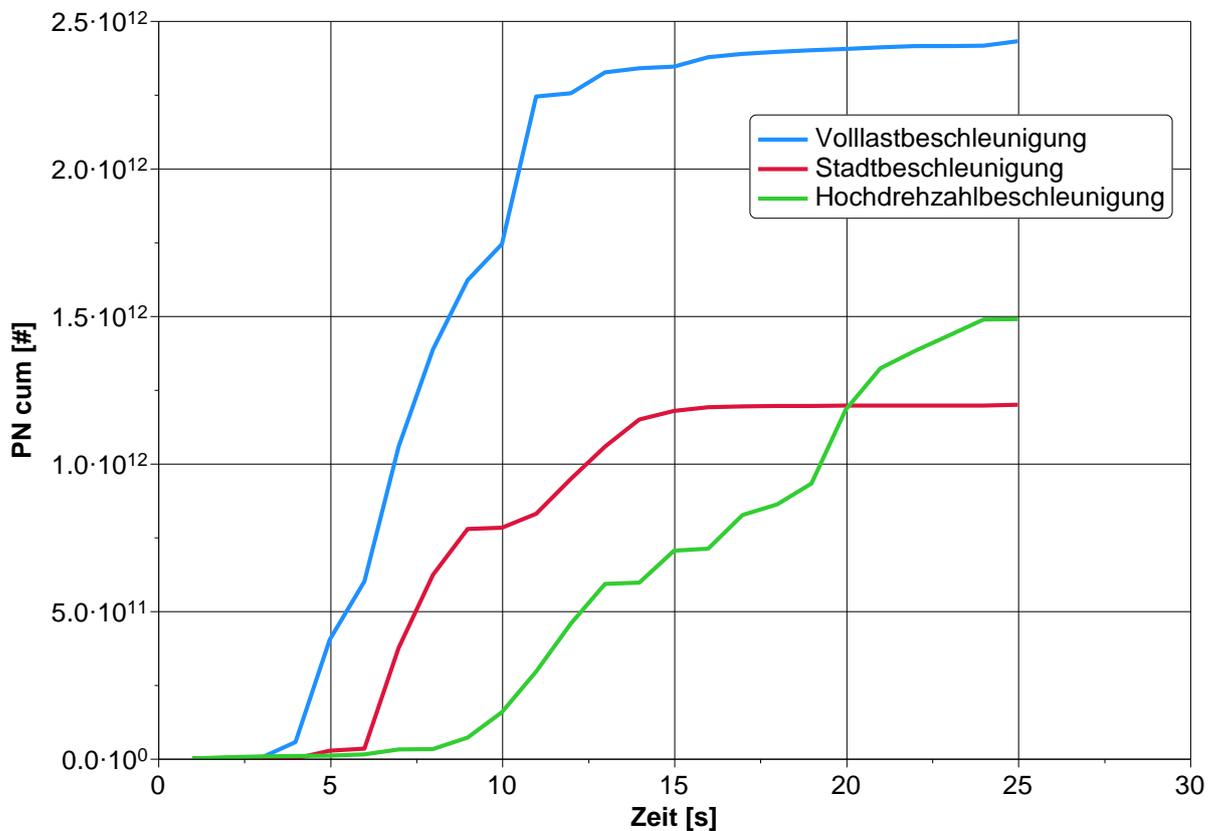


Bild 20 Partikelemissionen bei unterschiedlichen Beschleunigungen

Die Bildung von Partikeln ist stark geprägt von der Mischungszeit und Ladungsbewegung innerhalb des Brennraumes. Eine späte Einspritzung, hohe Lasten und der Betrieb mit $\lambda < 1$ fördern die Bildung von räumlich begrenzten Gebieten mit fettem Luftkraftstoffgemisch. Das Luftkraftstoffgemisch in diesen Bereichen verbrennt mit einem Mangel an Sauerstoff und führt so zur Bildung von Partikeln. Direkteinspritzende Motoren begünstigen die Entstehung der Partikel besonders [17].

Bei unserem Messfahrzeug besteht durch den direkteinspritzenden Ottomotor auch das Risiko der Brennraumbenetzung. Vor allem bei den vorherrschenden hohen Kraftstoffdrücken in Verbindung mit der hohen Kolbenposition zu Beginn der Einspritzung und den kalten Brennraumwänden, kann Bildung der lokalen fetten Gebiete zusätzlich begünstigen [17].

Die in Bild 20 abgebildeten Partikelverläufe bestätigen die vorangegangene Betrachtung zur Entstehung von Partikelemissionen. Die bei der Vollastbeschleunigung vorherrschenden hohen Lasten bei niedrigen Drehzahlen führen zu einem drastischen Anstieg der Partikelemissionen. Ähnliches ist zu Beginn der Stadtbeschleunigung zu erkennen. Die Partikel steigen zu Beginn der Beschleunigung ebenfalls stark an. Da jedoch die gewünschte Geschwindigkeit schneller erreicht ist, flacht der Verlauf auch früher wieder ab. Bei der Hochdrehzahlbeschleunigung ist eine ausreichende Dynamik im Brennraum vorhanden. Der Anstieg ist dementsprechend nicht so stark, wie bei den anderen Beschleunigungen. Der Partikelverlauf der Hochdrehzahlbeschleunigung überschreitet die Werte der Stadtbeschleunigung aufgrund der längeren Dauer der Beschleunigung und des höheren Kraftstoffeinsatzes.

3.6 Vertrauensbereich des Mittelwertes von RDE-Messfahrten

Im Rahmen der Vorbereitung der RDE-Messkampagne stellt sich die Frage, ob die Straßenmessungen, bei identischen Fahrbedingungen und mit gleichen Anforderungen, reproduzierbar sind. Oder ob die Verkehrseinflüsse schon allein ausreichen, um eine Reproduzierbarkeit zu gefährden.

Aus diesem Grunde werden in diesem Abschnitt, der Vertrauensbereich der Mittelwerte von 6 gleichgefahrenen Messfahrten bestimmt. Die Ergebnisse dieser sind in der Tabelle 4 abgebildet.

3.6.1 Fehlerminimierung durch Pre-und Post-Tests

In Vorbereitung auf die Messfahrten, wurde vor jeder Fahrt ein „Pre-Test“ durchgeführt. Dieser Pre-Test beinhaltet das Kalibrieren und Justieren der PEMS. Im Falle unseres Pegasor MI2 wurde ein sogenannter Zero Check durchgeführt. Das PEMS saugt dabei durch einen Filter nahezu Partikelfrei Umgebungsluft an. Wenn der Wert zu stark von dem im Vorfeld eingestellten Nullpunkt abweicht, wird eine Nullpunktkorrektur durchgeführt.

Genauso wichtig wie die Kalibrierung und Justierung der PEMS ist im Post Processing die Driftkorrektur. Nach der Durchführung der Testprozedur erfolgt ein weiterer Abgleich des Nullpunktes. Die Messwerte während des Testes müssen sich im Regelfall durch eine eventuell geringfügig einsetzende Nullpunktverschiebung unterscheiden. Sollte dies der Fall sein führt die Post Processing Software eine Driftkorrektur durch. Sind die Driftwerte zu groß liegt möglicherweise ein Defekt im Gerät vor und die Messung sind zu ungenau und werden nicht gewertet. Für die gesetzeskonforme Auswertung ist vor jedem Test die Kalibrierung der PEMS, sowie im Post-Test die Driftkorrektur durchzuführen.

Diese Maßnahmen sollen bei unserer Untersuchung dazu dienen, die groben Fehler zu minimieren.

3.6.2 Berechnung des arithmetischen Mittels

Für Berechnung des Vertrauensbereiches ist ein Erwartungswert erforderlich. Dies wird durch das arithmetische Mittel dargestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert der Messreihe. Das arithmetische Mittel wird wie folgt berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

x_i ...Einzelmesswert

n ...Messwertanzahl

Das arithmetische Mittel entspricht jedoch nicht dem gemessenen wahren Wert, nähert sich aber mit größer werdender Anzahl der Messungen diesem an. Die Berechnung des Mittelwertes ist für die Bestimmung der Standardabweichung unerlässlich [18].

3.6.3 Standardabweichung und Varianz

Mit Hilfe der Standardabweichung kann man die Zuverlässigkeit der Messwerte innerhalb der Messreihe bewerten. Im Gegensatz zum arithmetischen Mittel beeinflusst eine Erhöhung der Messungen die Auswirkung auf die Standardabweichung nicht spürbar.

Die Standardabweichung wird wie folgt berechnet:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2 \right]}$$

Die Varianz oder Streuung ist das Quadrat der Standardabweichung und das Maß für die Zufallsvariablen.

$$\text{var}(x) = \sigma^2$$

3.6.4 Medianberechnung

Der Median z ist wie das arithmetische Mittel ein Zentralwert. Die Werte müssen dazu zunächst der Größe nach geordnet werden. Der Median ist dann der Wert der in der Mitte der Messreihe steht. Da funktioniert jedoch nur bei Messreihen mit einer ungeraden Anzahl. Hat die Messreihe eine gerade Anzahl, wird von den beiden in der Mitte der Messreihe stehenden Werten der Mittelwert gebildet (3.6.2). Dieser Wert entspricht dann dem Median.

Der Median und das arithmetische Mittel haben unterschiedliche Eigenschaften. Der Median wird von Extrema beinahe nicht beeinflusst. Starke Abweichungen in der Messreihe stören den Wert des Median weniger. Das bringt jedoch auch Nachteile mit sich. Minima und Maxima sollten daher bei der Bestimmung des Median gesondert betrachtet werden. Die Auswirkung der Extrema sollte unbedingt mit berücksichtigt werden. [19]

3.6.5 Vertrauensbereich des Mittelwertes

Um zu bestimmen in welchem Bereich unsere wahren Werte mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegen, berechnen wir den Vertrauensbereich des Mittelwertes. Der Vertrauensbereich des Mittelwertes ist das Maß für die „Zuverlässigkeit“ des arithmetischen Mittels.

$$\Delta \bar{x} = t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

mit $t = 2,571$

Es wird ein Wert von $t = 2,571$ als statistischen Faktor angenommen, das bedeutet dass der Mittelwert zu 95% in diesem Bereich liegt. [20]

Nun lassen sich die jeweiligen Grenzwerte des Vertrauensbereiches berechnen.

Für den unteren Grenzwert gilt:

$$\mu_u = \bar{x} - t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

und der obere Grenzwert wird wie folgt berechnet:

$$\mu_o = \bar{x} + t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Tabelle 4: Vergleich der RDE-Messfahrten

Fahrt	PN [# / km]	CO ₂ [g / km]	B _s [l / 100 km]
1	$1,53 \cdot 10^{12}$	243,3	9,73
2	$1,65 \cdot 10^{12}$	239,1	9,5
3	$1,58 \cdot 10^{12}$	225,6	9,0
4	$1,58 \cdot 10^{12}$	231,6	9,3
5	$1,61 \cdot 10^{12}$	214,9	9,0
6	$1,52 \cdot 10^{12}$	235,0	9,4
Mittelwert	$1,58 \cdot 10^{12}$	231,4	9,3
Median	$1,58 \cdot 10^{12}$	233,3	9,35
Minimum	$1,52 \cdot 10^{12}$	214,9	9
Maximum	$1,65 \cdot 10^{12}$	242	9,73
Standardabweichung	$0,05 \cdot 10^{12}$	9,0	0,3
Varianz	$0,002 \cdot 10^{12}$	81,8	0,1
Vertrauensbereich $\Delta \bar{x}$	$0,04 \cdot 10^{12}$	7,35	0,24

Im Bild 21 sind die prozentualen Abweichungen der Partikel und CO₂-Emissionen vom Mittelwert dargestellt. Der Vertrauensbereich P=95% wurde ebenfalls mit dargestellt. Somit lässt sich anhand unserer Messungen sagen, dass die wahren Werte für die Partikelemissionen zwischen $1,54 \cdot 10^{12}$ und $1,62 \cdot 10^{12}$ Partikel je Kilometer. Bei den CO₂-Emissionen liegen die wahren Werte zwischen 224,05 und 238,75 Gramm je Kilometer. Es ist jedoch zu sehen, dass einige der Messwerte, bei den Partikel- als auch den CO₂-Emissionen nicht im Vertrauensbereich liegen. Alle Messwerte befinden sich in angrenzenden Bereich mit einer Signifikanz von 99%, jedoch aber nicht im Vertrauensbereich mit einer Signifikanz von 95%. Die Signifikanz von 95% wird jedoch in bei statischen Auswertungen am häufigsten verwendet.

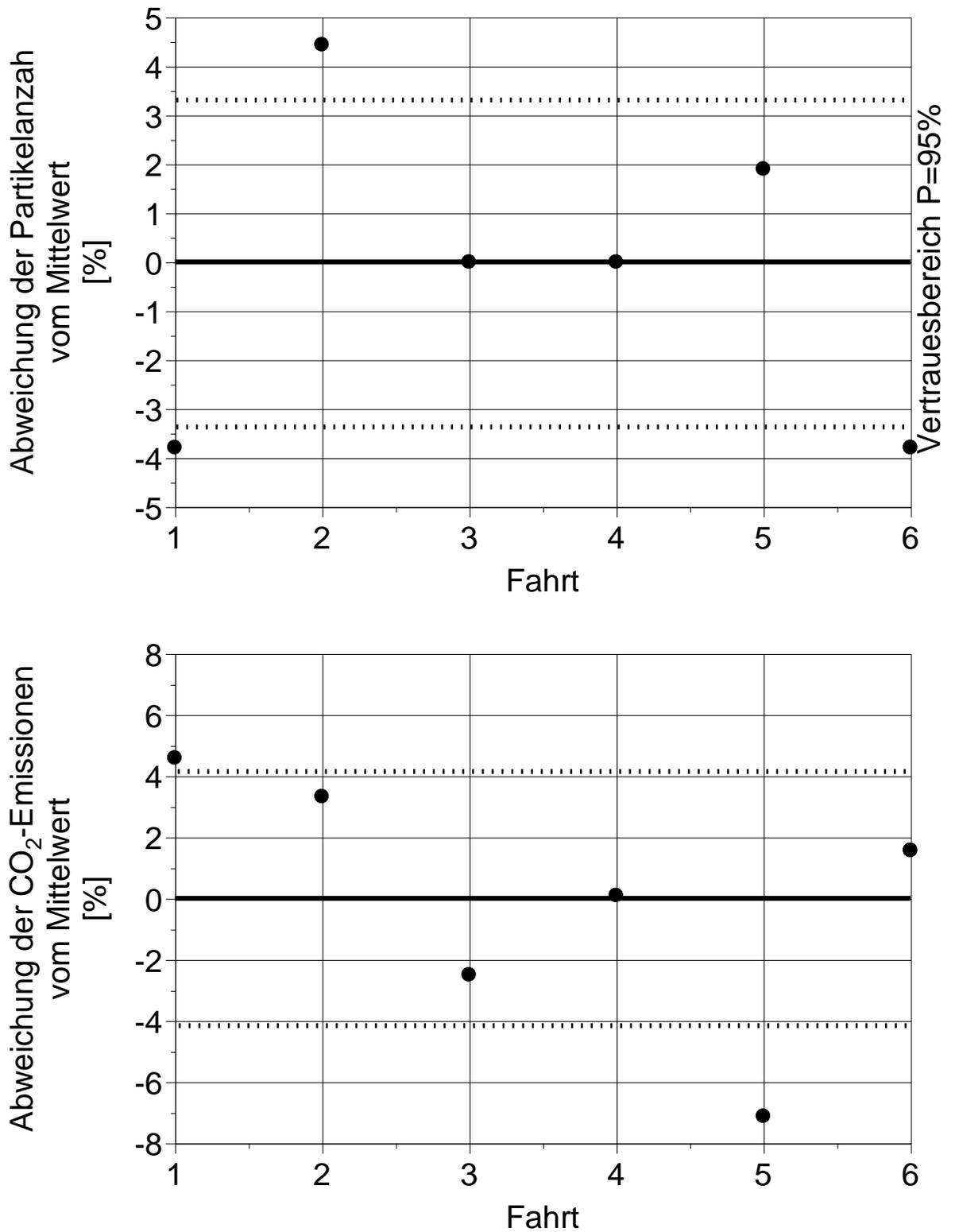


Bild 21: Abweichung vom Mittelwert und Vertrauensbereich von gleichgefahrenen Straßenmessungen

4 Untersuchen der Auswirkungen bei Verschärfung von den Randbedingungen

Im vorherigen Kapitel wurden die verschiedenen Auswertemethoden der RDE-Entwicklungsfahrzyklen und die Messtechnik näher erläutert. In diesem Kapitel werden die Auswirkungen bei Verschärfung des RDE-Zyklus näher beleuchtet. Es soll dadurch aufgezeigt werden, wie sehr die Veränderung einzelner Randbedingungen die Partikelemissionen als auch den CO₂-Ausstoß beeinflussen können. Im Fokus dieser Betrachtung liegen dabei folgende Kriterien:

- Motorkaltstart und Warmlauf
- Messfahrten bei unterschiedlichen Steigungsprofilen
- Fahrdynamik
- Alterung/Verschmutzung an den Einspritzdüsen

Die Reproduzierbarkeit der Test ist sehr stark eingeschränkt. Anhand der gesammelten Daten werden daher lediglich relevante Teilabschnitte der Fahrzyklus analysiert. Dies soll verhindern, dass durch nicht vorhersehbare Ereignisse das Testergebnis verfälscht wird. Im Rahmen der Nachhaltigkeit sollten nicht unnötig viele Messfahrten durchgeführt werden, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzwingen.

Im Vorfeld sollen jedoch noch einmal die Zyklen des NEFZ, des WLTC und des RDE miteinander verglichen werden. Diese Untersuchung soll Aufschluss darüber geben, wie die Anforderungen an die Automobilindustrie, hinsichtlich der Partikel- und Gasemissionen, durch die Gesetzgebung steigen werden.

4.1 Vergleich der Fahrzyklen

Für diese Untersuchung wurde die einzelnen Fahrzyklen auf einem verifizierten Rollenprüfstand des TÜV Rheinland Group gefahren. Jeder Test wurde gemäß den gesetzlichen Anforderungen durchgeführt. Anhand der Fahrwiderstandkoeffizienten und des Geschwindigkeitssignales konnte der RDE Idstein, ohne Einfluss der Topografie, auf den Rollenprüfstand übertragen werden. Bei den Fahrwiderstandkoeffizienten handelt es um die für den NEFZ ermittelten Ausrollkoeffizienten. Zusätzlich dazu wird auch der regulär auf der Straße gefahrene „RDE Idstein“ in diesen Vergleich mit aufgenommen. Dadurch soll aufgezeigt werden, wie die Bedingungen während der Straßenmessung die Messergebnisse verändern können.

In der Einleitung wurde bereits erwähnt, dass der NEFZ lediglich einen kleinen Bereich des Motorkennfeldes abdeckt. Um diese Aussage zu untersuchen, wurden die Motordrehmomente während der Messfahrten auf dem Rollenprüfstand mit aufgezeichnet. In denen aus dem Bild 16 bekannten Punktediagrammen, konnte so die einzelnen Fahrzyklen im Motorkennfeld abgebildet werden. Das Ergebnis ist in Bild 22 zu sehen.

Der Kennfeldaufenthalt unseres Messfahrzeuges während des NEFZ liegt im Bereich von 0 bis 175 Nm für das Motordrehmoment und einem Drehzahlbereich von 0-2200 min^{-1} . Während des NEFZ-Fahrzyklus wurde die Vollastlinie nicht erreicht. Dieses Ergebnis zeigen deutlich wie realitätsfern der NEFZ ist. Während des WLTC-Fahrzyklus wurde ein größerer Bereich des Motorkennfeldes durchfahren. So ist zu sehen, dass des Öfteren die Vollastlinie erreicht wurde. Es ist ebenfalls öfter eine höhere Drehzahl erreicht worden, wobei die maximale Drehzahl circa 3000 min^{-1} betrug. Bei einem RDE-Fahrzyklus ist im Grunde eine volle Ausschöpfung des Motorkennfeldes möglich. Im Vergleich zum WLTC verschieben sich die Punkte des Diagrammes noch weiter in höhere Drehzahl und Drehmomentbereiche hinein. Während der Straßenmessung wurden tendenziell höhere Lasten gefahren, als während der anderen Fahrzyklen.

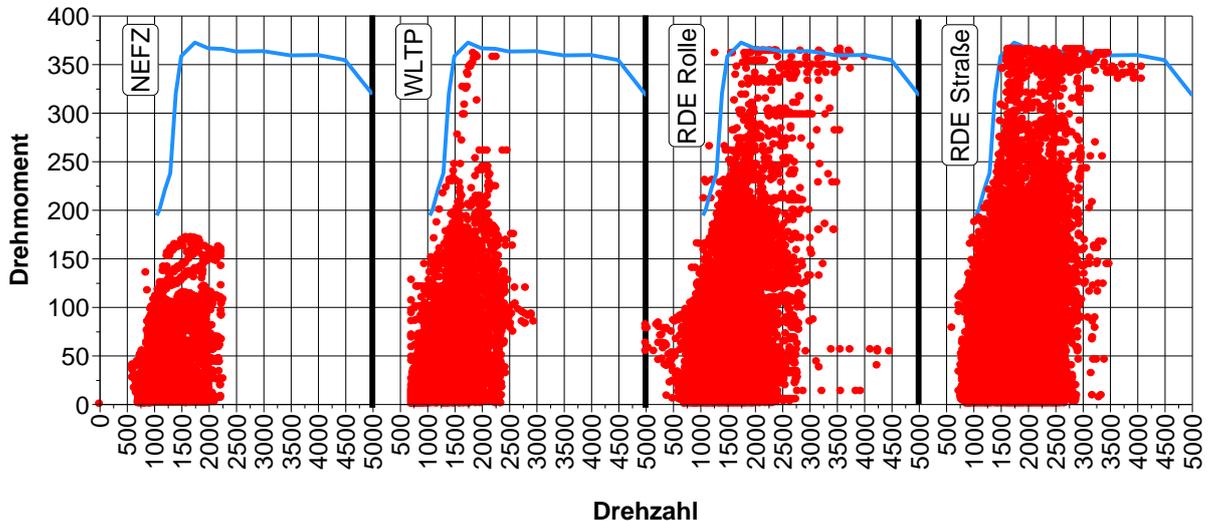


Bild 22: Kennfeldaufenthalte der einzelnen Fahrzyklen

Die Partikel und Gasemissionen und die Durchschnittsverbräuche für die vier Zyklen sind im Bild 23 dargestellt. Der Durchschnittsverbrauch des NEFZ belief sich dabei auf 6,6 l auf 100 km, bei dem WLTP auf 7,1 l auf 100 km und beim RDE-Fahrzyklus auf 6,9 l auf 100 km. Die Werte liegen nahe beieinander. Die Differenz von NEFZ und WLTP belaufen sich 5%. Der auf der Rolle gefahrene RDE-Fahrzyklus weist eine Differenz von 3% im Vergleich zu dem WLTC-Fahrzyklus auf. Die CO₂-Emissionen sind analog zu den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch. Die Stickoxid-Emissionen weichen stark voneinander ab. Die Differenz zwischen den NO_x-Emissionen ist annähernd gleich. Im NEFZ-Fahrzyklus wurden 21,8 mg/km Stickoxide emittiert. Bei dem WLTP-Fahrzyklus waren es 20,1mg/km und dem auf der Rolle gefahrenen RDE-Fahrzyklus waren es hingegen 21,6 mg/km. Die Grenzwerte des Euro6c für die Stickoxidemissionen wurden nicht überschritten. Die Partikelemissionen weichen im Vergleich zu den Gasemissionen noch stärker voneinander an. Während des NEFZ-Fahrzyklus wurde die geringste Anzahl an Partikeln gemessen. Es ist dabei ein Wert von $6,76 \cdot 10^{10}$ Partikel pro Kilometer erreicht worden, was 11% des Grenzwertes der Euro6c entspricht. Während des WLTC-Fahrzyklus stiegen die Partikelemissionen merklich an und es wurden fast 13 mal mehr Partikel pro Kilometer emittiert, als es bei dem NEFZ-Fahrzyklus der Fall war. Es ist ein Wert von $8,65 \cdot 10^{11}$ Partikel pro Kilometer gemessen worden, was den Grenzwerte des Euro6c überschreitet. Der auf der Rolle gefahrene RDE Idstein Zyklus

lag mit $5,20 \cdot 10^{11}$ Partikel pro Kilometer noch unterhalb der Grenze der EURO6c Grenzwerte.

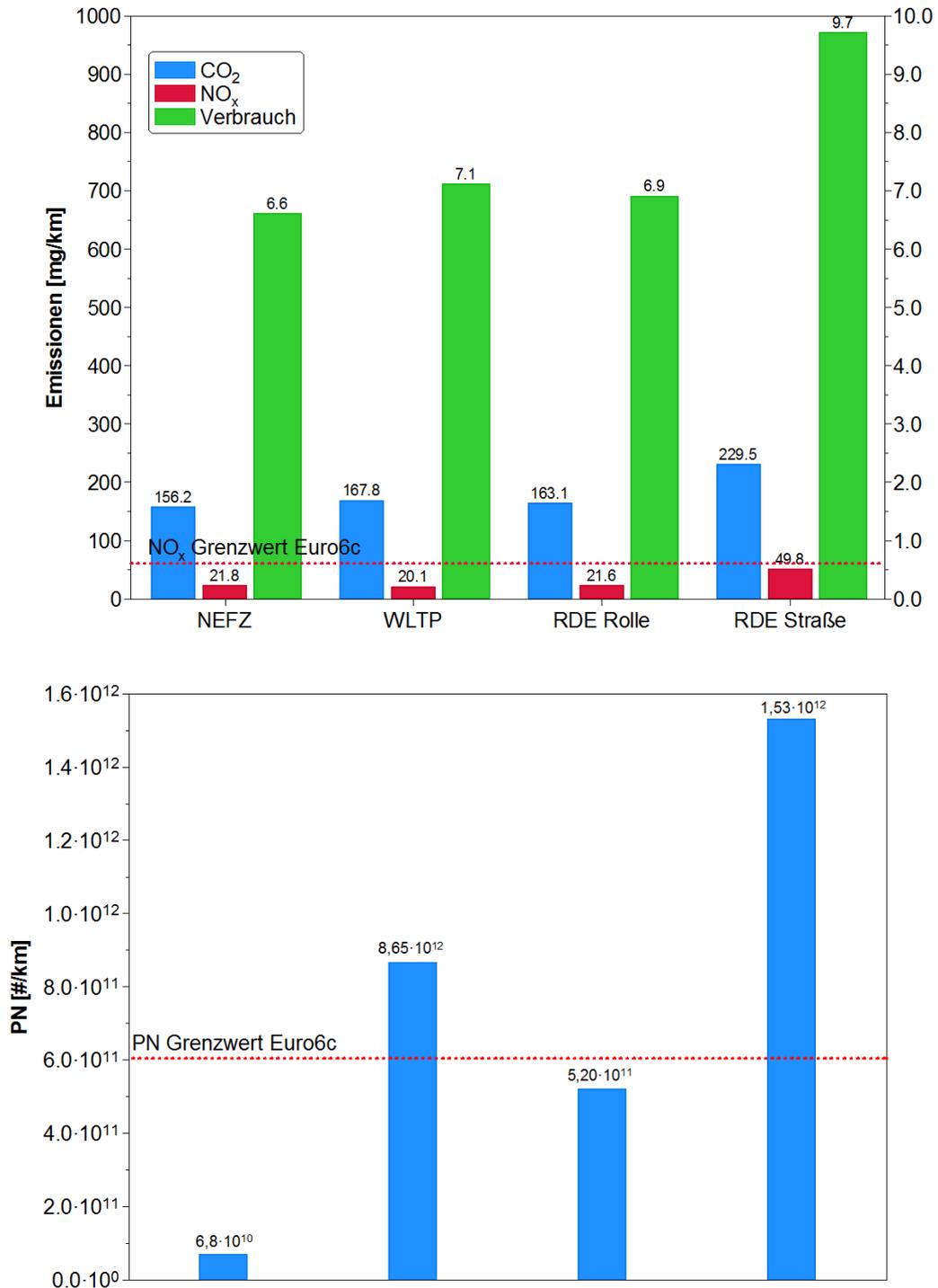


Bild 23: Emissionsvergleich der Fahrzyklen

Mit Hilfe der dynamischen Auswertemethode lassen sich die Unterschiede der Gasemissionen erklären. Für alle drei Fahrzyklen wurde das 95. Perzentil berechnet und dem Bild 24 dargestellt. Zusätzlich wurde der Gleichfahranteil und die dabei zurückgelegte Strecke berechnet.

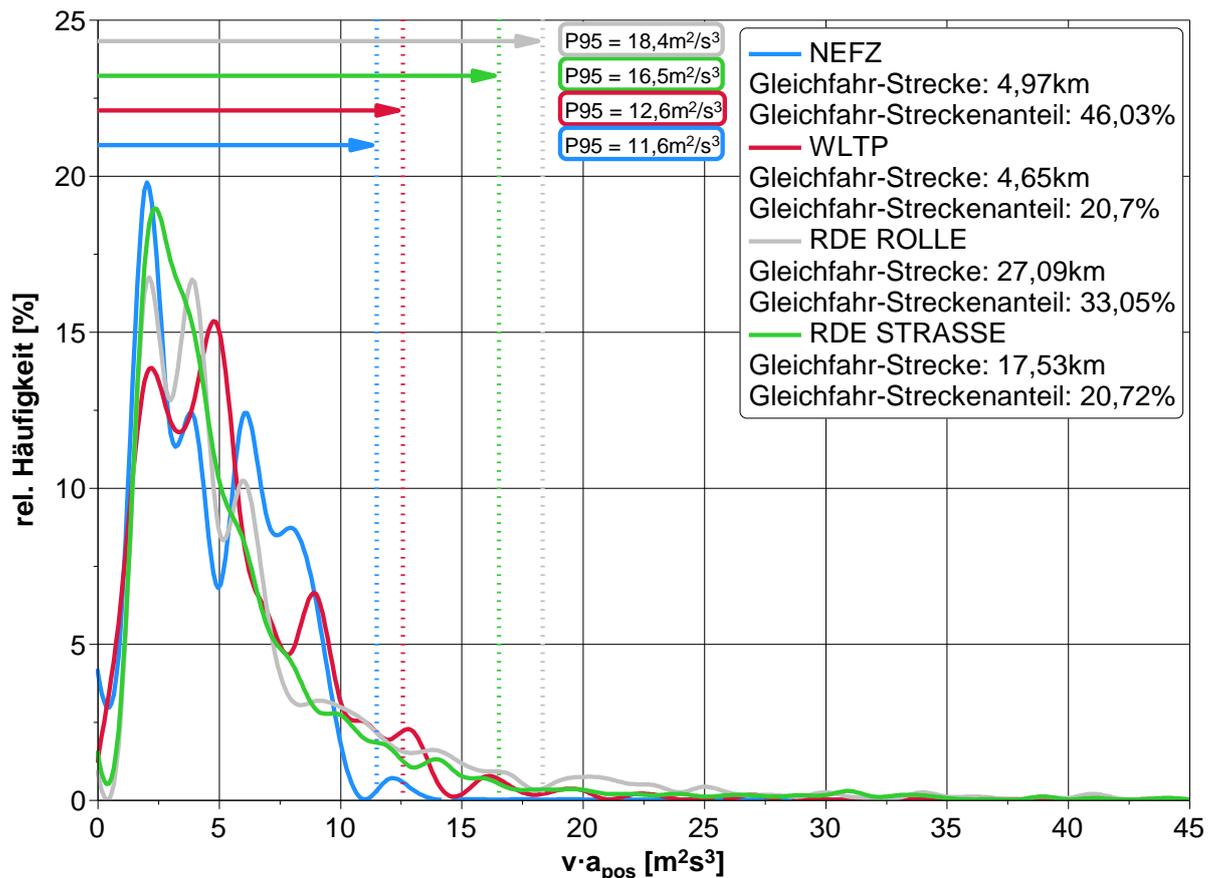


Bild 24: Dynamische Auswertung der verschiedenen Fahrzyklen

Der NEFZ hat von allen Fahrzyklen die geringste Dynamik und den größten Gleichfahranteil. Dadurch lässt sich der geringe Verbrauch, sowie CO₂-Emissionen im Vergleich zu den anderen Fahrzyklen erklären. Der WLTC-Fahrzyklus weist eine höhere Dynamik auf. Es wurde für diesen Fahrzyklus nicht das höchste 95. Perzentil berechnet, doch aber der geringste Gleichfahranteil. Die daraus resultierenden Lastsprünge und die hohen Dynamiken des WLTC-Fahrzyklus sind für den starken Anstieg der Partikelemission verantwortlich.

Der Vergleich des auf der Rolle gefahrenen „RDE Idstein“ und der Messung auf der Straße zeigt deutlich die Abweichung der Emissionen, wenn lediglich die Ausrollkoeffizienten der Homologation genutzt werden. Bei einem auf der Straße gemessenen Durchschnittsverbrauch von 9,7 Liter je 100 Kilometer und einer CO₂-Belastung von 243g/km, liegt der Mehrverbrauch bei 3,6 Liter je 100 Kilometern. Die Emissionen der Stickoxide hat sich in Folge der Straßenmessung mehr als verdoppelt. Bei einem auf der Straße gemessenem Wert von knapp 50 mg/km, gegenüber dem auf der Rolle gemessenen 21 mg/km, entspricht das einem Zuwachs von 138%. Trotz dieses drastischen Anstieges übertrifft der Wert nicht den Grenzwert der Euro6c für Stickoxide. Ein starker Anstieg ist ebenfalls bei den Partikelemissionen zu sehen. Die Werte der Straßenmessung übertreffen die Rollenmessung um 195%. Der ermittelte Wert betrug $1,53 \cdot 10^{12}$ Partikel pro Kilometer. Dieser Wert überschreitet klar den Grenzwert der Euro6c. Um den Fahrzyklus trotzdem zu bestehen, wäre ein Konformitätsfaktor von 2,6 erforderlich.

Der Einfluss der Streckengegebenheiten ist in diesem Vergleich ein nicht zu unterschätzender Faktor. Die Ausrollkoeffizienten der Homologation spiegeln nicht die realen Fahrwiderstände des Messfahrzeuges wider. Zusätzlich dazu wurde während der Straßenmessung die höchste Dynamik erreicht, bei einem geringeren Gleichfahranteil. Alle diese Faktoren sind maßgeblich an der Erhöhung der Abgas- als auch Partikelemissionen beteiligt.

4.2 Einfluss der Temperatur

Um den Einfluss der Temperaturen zu untersuchen, wurden drei Messfahrten mit unterschiedlichen Starttemperaturen gefahren. Für die Kaltstartmessung wurde der Motor über Nacht mit Trockeneis herunter gekühlt. In den warmen Sommermonaten erreichten wir so eine Starttemperatur von unter 10°C. Die Normstartmessung erfolgt bei einer Kühlwassertemperatur von 70°C. Die Warmstartmessung erfolgte erst nach mindestens zwei Stadtrunden. Das Kühlwasser erreichte dadurch bei Start der Messung bis zu 105°C. Für diese Untersuchung wird nur der Stadtzyklus betrachtet. Hier sind die Einflüsse der Starttemperaturen am deutlichsten erkennbar. Hierfür wurde auch die Partikelemissionen über der gefahrenen Strecke aufgetragen, um eine Verzerrung der Diagrammverläufe durch Standzeit und Verkehrseinflüsse zu minimieren. Als Fahrmodus für diesen Test wurde „Efficiency“ gewählt. Des Weiteren wurde versucht, die Messungen annähernd reproduzierbar zu fahren. Die Partikelemissionen sind im Bild 25 erkennbar. Die Kaltstartfahrt erreichte erwartungsgemäß die höchsten Partikelemissionen. Es wurde $7,84 \cdot 10^{13}$ Partikel ausgestoßen. Dies entspricht einem Wert von $3,34 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer. Bei dem Normstart-Startfahrzyklus wurden $5,15 \cdot 10^{13}$ Partikel emittiert, auf der Strecke gewichtet waren es $2,19 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer. Während der Kaltstartfahrt wurden 52% mehr Partikel ausgestoßen, als bei dem Normstart-Fahrzyklus. Der Warmstart-Fahrzyklus emittierte lediglich $3,69 \cdot 10^{13}$ Partikel, dies entspricht einem Wert von $1,14 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer. Im Vergleich zu dem Warmstart-Fahrzyklus wurden während des Kaltstart-Fahrzyklus 112% mehr Partikel ausgestoßen. Der Kaltstart verursacht so hohe Partikelemissionen, dass innerhalb der ersten zwei Kilometer die gleiche Anzahl an Partikeln ausgestoßen wurde, wie auf dem gesamten Warmstart-Fahrzyklus innerhalb der Stadt. Kritisch sind die ersten 90 Sekunden der Messfahrt. Hier werden schon $2,72 \cdot 10^{13}$ Partikel emittiert. Würde man die bis zu diesem Zeitpunkt emittierten Partikel vernachlässigen, würden sich die kumulierten Partikel auf gleichem Niveau wie die Partikel des Normstart-Fahrzyklus bewegen.

Während des Kaltstartes wird der Motor mit der Einspritzstrategie „Kat-Heizen“ betrieben [10]. Die im Brennraum angeordneten Einspritzdüsen führen dabei 2 Einspritzungen durch jeweils eine im Kompressions- und Verdichtungstakt. Durch die Spätlegung der Einspritzung bleibt dem Kraftstoff vor der Zündung nicht mehr genügend Zeit um eine vollständig mit dem Sauerstoff zu durchmischen. Die Gebiete, die unter Sauerstoffmangel verbrennen, fördern den Partikelaustritt. Während des Kaltstart und der Warmlaufphase bildet sich zudem vermehrt ein Kraftstofffilm an den kalten Brennraumwänden.

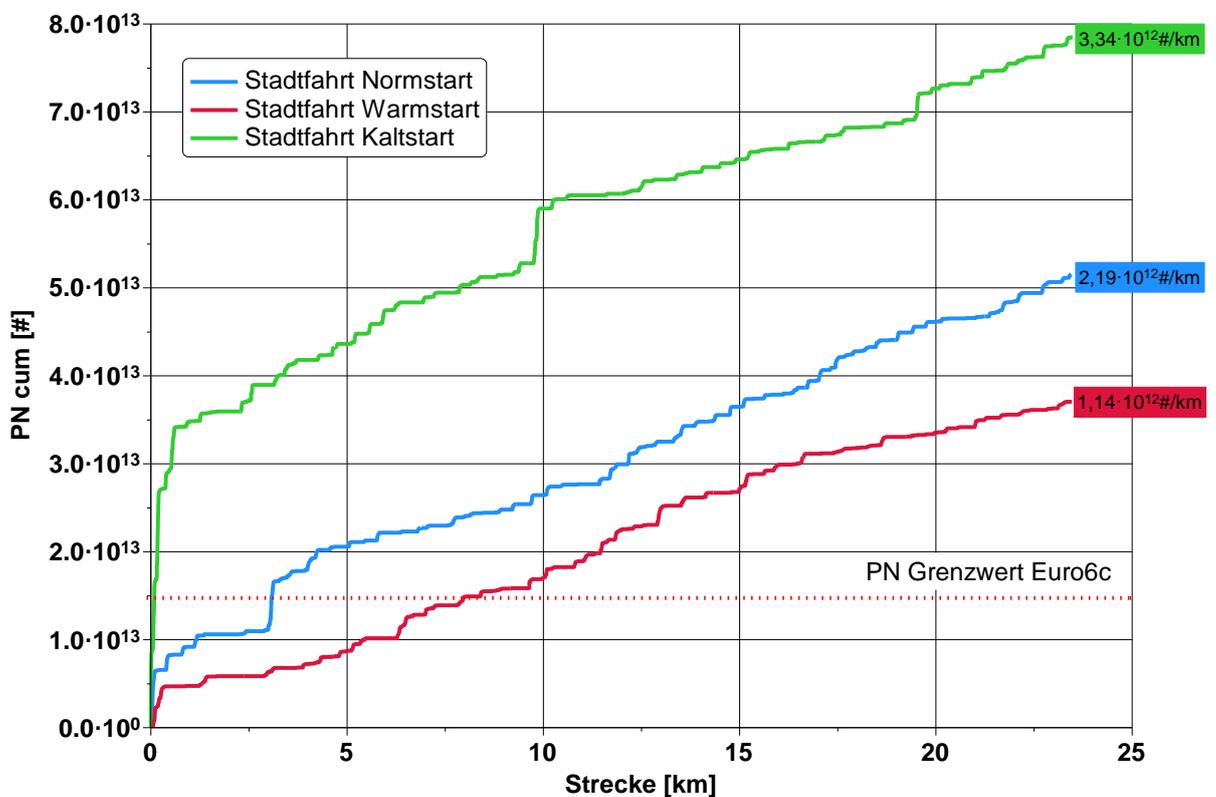


Bild 25: Verlauf der Partikelemissionen bei unterschiedlichen Starttemperaturen

Die CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Starttemperatur-Fahrten sind in Bild 26 dargestellt. Die Werte liegen über dem gesamten Bereich nahe beieinander. Während der Kaltstartfahrt emittierte der Motor auf dem Idsteiner Stadtzyklus, bei einem Durchschnittsverbrauch von 12,6 Liter/100 km, 314 Gramm je Kilometer. Die Normstartfahrt verursachte 5% weniger CO₂-Emissionen bei einem Verbrauch von 11,9 Liter/100 km, entspricht dies einen Wert von 298,67 Gramm CO₂ je Kilometer. In der

Messfahrt mit dem Warmstart wurde der geringste Wert ermittelt. Die gemessene Verbrauch des Fahrzeuges betrug 11,44 Liter/100 km, was einem Wert von 286,06 Gramm je Kilometer entspricht. Die maximale Differenz der CO₂-Emissionen beträgt 10%.

Der Temperatur hat ebenfalls Einfluss auf die CO₂-Emission. Die Unterschiede sind jedoch, im Vergleich zu den Partikelemissionen, nicht sonderlich groß. Trotz allem zählt für die Entwicklung moderner Motoren momentan jedes Gramm an Kohlenstoffdioxid, was sich einsparen lässt. Während des Kaltstartes und der Warmlaufphase sind die Verluste des Motor durch die kalten Brennraumwände höher. Es lagert sich vermehrt Kraftstoff an ihnen ab, was nicht nur zu erhöhten Partikelemissionen führt, sondern auch zu einem Mehrverbrauch. Die Kaltstartanreicherung führt ebenfalls zu einem Mehrverbrauch. Der Mehrverbrauch fällt jedoch aufgrund der bereits erwähnten Einspritzstrategie und des Thermomanagements des Motors relativ gering aus.

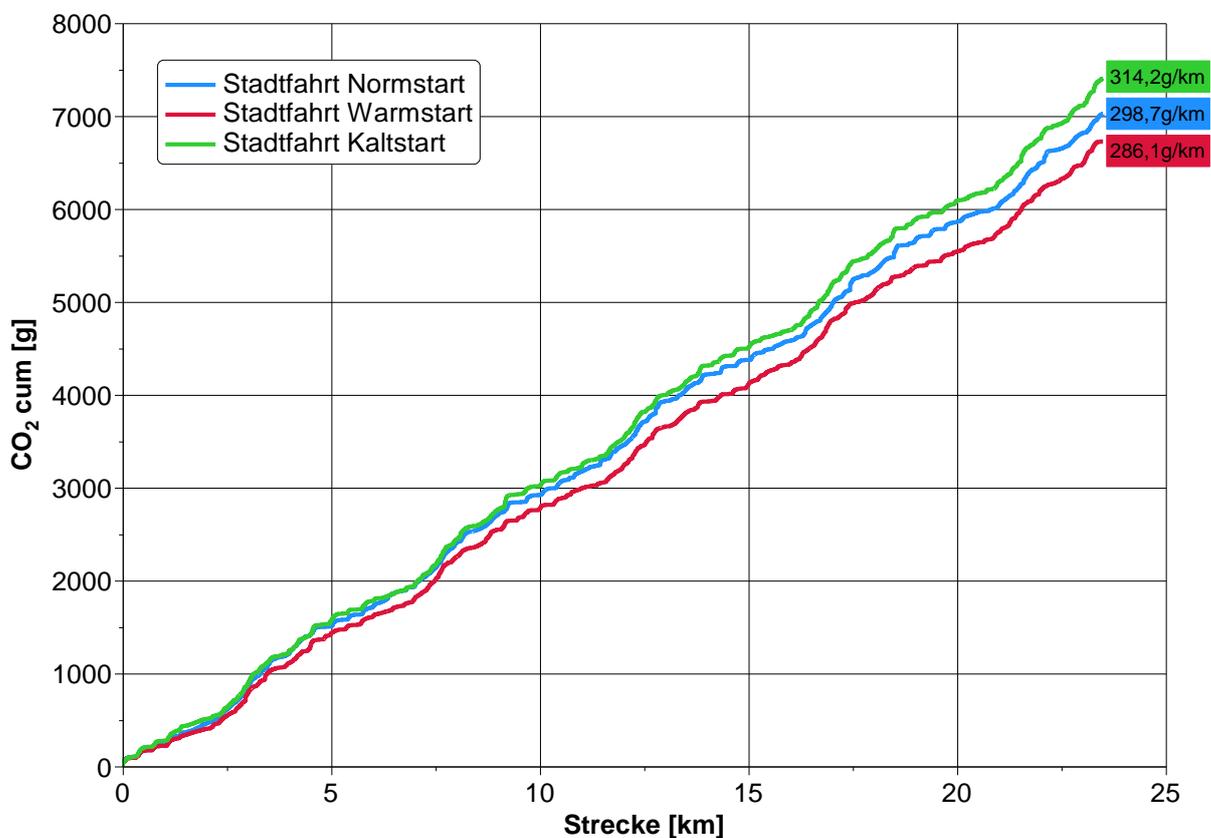


Bild 26 Verlauf der CO₂ Emissionen bei unterschiedlichen Starttemperaturen

4.3 Topographie-Einflüsse

Um den Einfluss von Steigung untersuchen zu können, wurde ein Fahrzyklus auf einer relativ ebenen Strecke in Norddeutschland, bei Hagenow, gefahren. Der Vorteil der ebenen Strecke besteht darin, dass bei Beschleunigungen nur selten die Einflüsse der Topografie spürbar sind. Der „RDE-Hagenow“ soll deshalb für diese Untersuchung das „best case“-Szenario abbilden. Um ein „worst case“-Szenario abzubilden, wurde der Überlandabschnitt des „RDE Idstein“ abgeändert. Der Überlandabschnitt führt bei dieser Variante über die „Wiesbadener Platte“. Die „Wiesbadener Platte“ stellt durch ihre steilen Anstiege und Gefälle, ein gutes Beispiel für die verschärfte Variante einer Überlandfahrt dar. Während des Überlandabschnittes sind vermehrt Sektionen mit einer Höhendifferenz von bis zu 240 Höhenmetern zu überwinden. Die Messfahrten wurden im Fahrmodus „Efficiency“ und mit „durchschnittlicher“ Fahrweise absolviert. Der Verlauf der Partikelemissionen ist im Bild 27 zu sehen. Die kumulierten Partikel, sowie die Partikel je gefahrenen Kilometer, waren im verschärften Fahrzyklus über die Wiesbadener Platte am höchsten. Hier wurde ein Wert von $1,75 \cdot 10^{14}$ Partikeln erreicht, was $2,06 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer entspricht. Der Partikel ausstoß des Idstein-Fahrzyklus belief sich auf $1,3 \cdot 10^{14}$ Partikeln und bei dem Hagenow-Zyklus $1,61 \cdot 10^{14}$ Partikel. Die Differenz der Partikelemissionen zwischen den beiden Fahrzyklen Idstein und Hagenow beträgt 24%. Bei den Partikelemissionen je gefahrenen Kilometer hingegen sinkt die Differenz, da die Strecke des „RDE-Hagenow“ 10km länger ist. Der Idstein-Zyklus erreichte einen Wert von $1,54 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer erreicht. Beim „RDE-Hagenow“ waren es $1,70 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer. Das entspricht einer relativen Differenz von 10%. Bei der verschärften Version des RDE-Idstein wurden 34% mehr Partikel pro Kilometer emittiert, als in normalen Idstein-Fahrzyklus. Im direkten Vergleich mit dem „RDE Hagenow“ waren es 21% mehr Partikel pro gefahrenen Kilometer. Eine Überschreitung der Partikelemissionsgrenzwerte der Euro6c ist bei allen Fahrzyklen erfolgt.

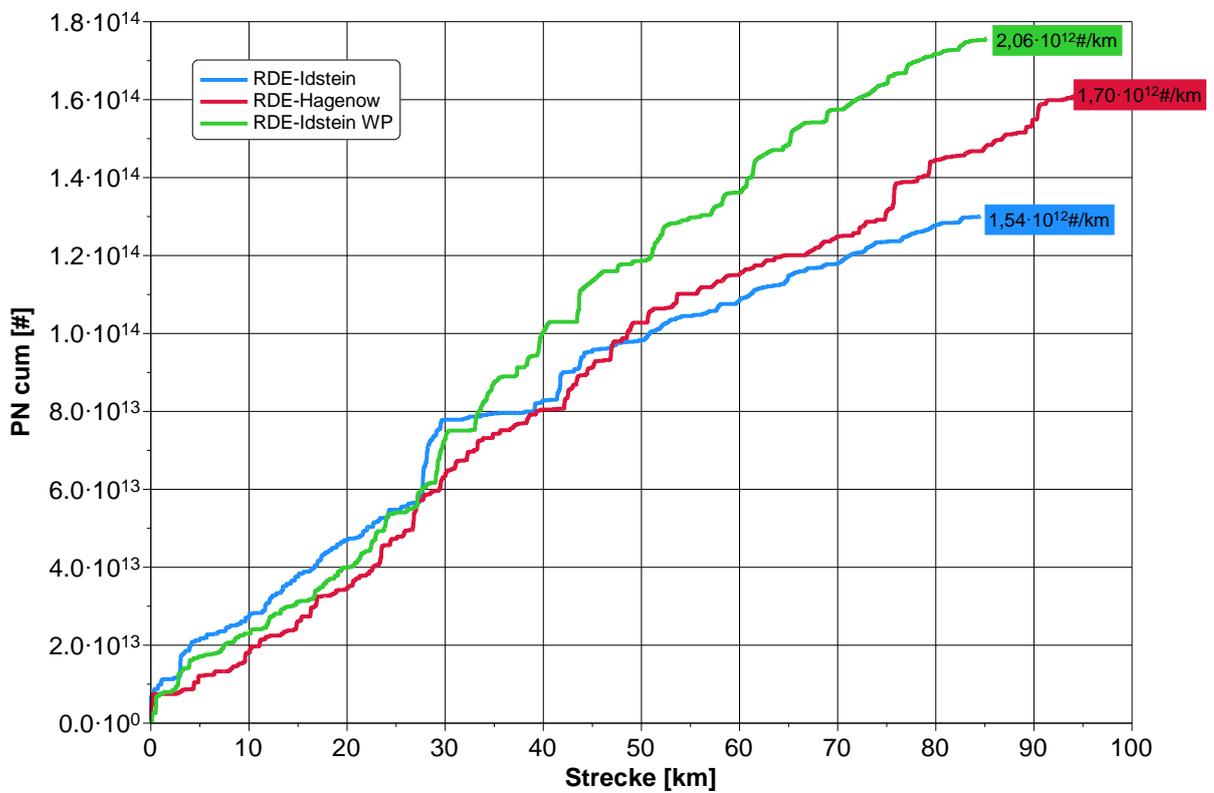


Bild 27: Verlauf der Partikelemissionen bei Messfahrt mit unterschiedlicher Steigungsprofilen

Ein detaillierter Ausschnitt der einzelnen Überlandabschnitte ist im Bild 28 zu sehen. In diesem Bild wurde die Höhe ü.n.N zusätzlich zu den kumulierten Partikelemissionen aufgetragen. So lassen sich die Beziehungen zwischen den während der Fahrt austretenden Steigungen und den Anstiegen der Partikelemissionen herleiten. Die Referenz für diesen Vergleich stellt der „RDE Hagenow“ dar. In den ersten 5 Kilometern sind starke Anstiege der Partikelemissionen während des Überlandabschnittes des „RDE Idstein“ und der „Wiesbadener Platte“ erkennbar. Dies sind die Auswirkungen der Steigungsfahrten. Bei dem „RDE Idstein“ nehmen Partikelemissionen jedoch stärker zu, als bei der Fahrt über die „Wiesbadener Platte“, was sich durch den stärkeren Anstieg erklären lässt. Diese anfänglichen Anstiege der Partikelemissionen werden aber durch die relative lange Gefällstrecke, zum einem späteren Zeitpunkt der Fahrt, kompensiert und unterschreiten dann sogar die Werte des Hagenow-Fahrzyklus. Die Summe der Partikel betrug in dem Überlandabschnitt des „RDE Idstein“ $4,66 \cdot 10^{13}$ und bei dem Überlandabschnitt des Hagenow-Fahrzyklus $5,58 \cdot 10^{13}$. Die Fahrt über die Wiesbadener

Platte hingegen weist einen deutlichen höheren Anteil an Steigungsfahrten auf, weshalb auch die Partikelemissionen deutlich höher sind. Die Summe der ausgestoßenen Partikel betrug $7,9 \cdot 10^{13}$. Auf die Strecke bezogen, emittierte das Fahrzeug während der verschärften Überlandfahrt 60% mehr Partikel als der normale Idstein-Zyklus.

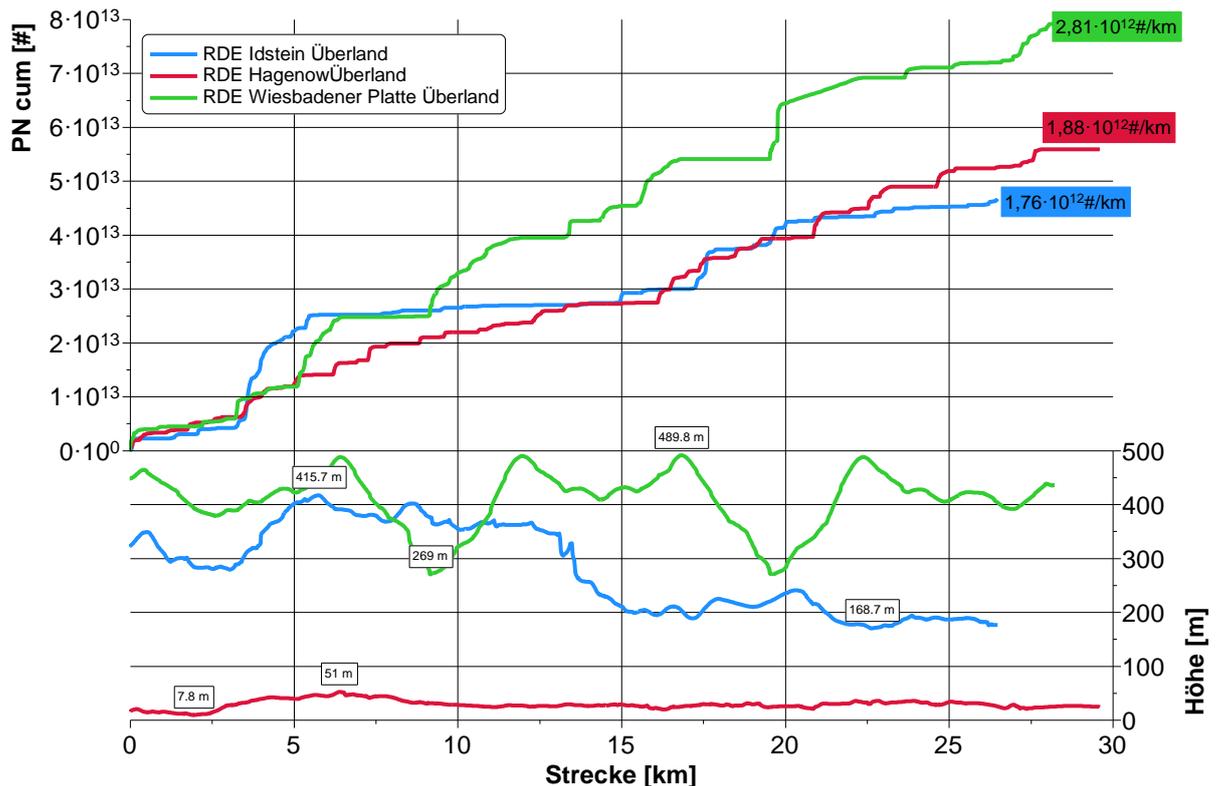


Bild 28: Verlauf der Partikelemission im Überlandabschnitt der verschiedenen RDE Messfahrten mit unterschiedlichen Steigungen und dazugehörigen Höhenprofilen.

Während der Steigungsfahrten verschiebt sich der Betriebsbereich des 2.0l TFSI in höhere Lastbereiche. Der Motor ändert zudem die Einspritzstrategie von der Multipoint-Einspritzung zu einer zweifachen Direkteinspritzung [10]. Wie im Vorfeld beschrieben, neigen direkteinspritzende Benzinmotor zu erhöhten Partikelemissionen. Bei der Fahrt auf der „Wiesbadener Platte“ wurden aufgrund des Steigungsgradienten selten hohe Drehzahlen erreicht. Die geringe Luftbewegung fördert, bei dem Betrieb mit Direkteinspritzung, die Bildung lokal begrenzter Gebiete mit Kraftstoffüberschuss. Dies begünstigt zusätzlich die Bildung von Partikel.

Die CO₂-Emissionen sind Bild 29 abgebildet. Im Vergleich zu dem Partikelemissionen fällt hier zunächst auf, dass der „RDE-Hagenow“ deutlich unterhalb der anderen beiden Fahrzyklen liegt. Die CO₂-Emissionen je gefahren Kilometer betragen 202 Gramm je Kilometer, bei einem Durchschnittsverbrauch von 8,4 Litern je 100 Kilometer. Der „RDE Idstein“ Fahrzyklus erreichte einen Wert von 243 Gramm CO₂ je gefahren Kilometer. Es wurde ein Durchschnittsverbrauch von 9,7 Liter je 100 Kilometern während des Fahrzyklus erzielt. Die Werte des verschärften „RDE Idstein“ Fahrzyklus, über die Wiesbadener Platte, sind auch bei den CO₂-Emissionen am höchsten. Es wurden 263 Gramm je Kilometer emittiert, bei einem Durchschnittsverbrauch von 10,5 Liter je 100 Kilometern. Der Einflüsse von Steigungen und Gefällen sind auch bei den CO₂ Emissionen deutlich erkennbar. Der Verlauf der CO₂ Emissionen während des „RDE Hagenow“ ist annähernd linear, was, wie bei den Partikelemissionen, auf die vernachlässigbar kleinen Steigungen, beziehungsweise Gefällen, zurückzuführen ist. Dies wird schon im Stadtbereich der Messung deutlich, in der sich der RDE Hagenow deutlich von den RDE Idstein, sowie seiner verschärften Variante unterscheidet. Während der Stadtfahrt wurde im RDE Hagenow 236 Gramm pro Kilometer CO₂ ausgestoßen, bei einem Durchschnittsverbrauch von 10,3 Liter je 100 Kilometer. Die CO₂ Emissionen der beiden RDE Fahrzyklen „Idstein“ und seine verschärfte Variante sind aufgrund der gleichen Strecken annähernd gleich. Es wurden 264 Gramm CO₂ pro Kilometer, bei einem Durchschnittsverbrauch von 11,5 Liter je 100 Kilometer bei dem RDE-Idstein emittiert. In der verschärften Variante waren es mit 266 Gramm CO₂ pro Kilometer geringfügig mehr. Die Abweichungen der Verläufe lassen sich durch die unterschiedlichen Verkehrsbedingungen erklären, da zum Beispiel schon die Standzeiten der beiden Fahrten nicht identisch waren.

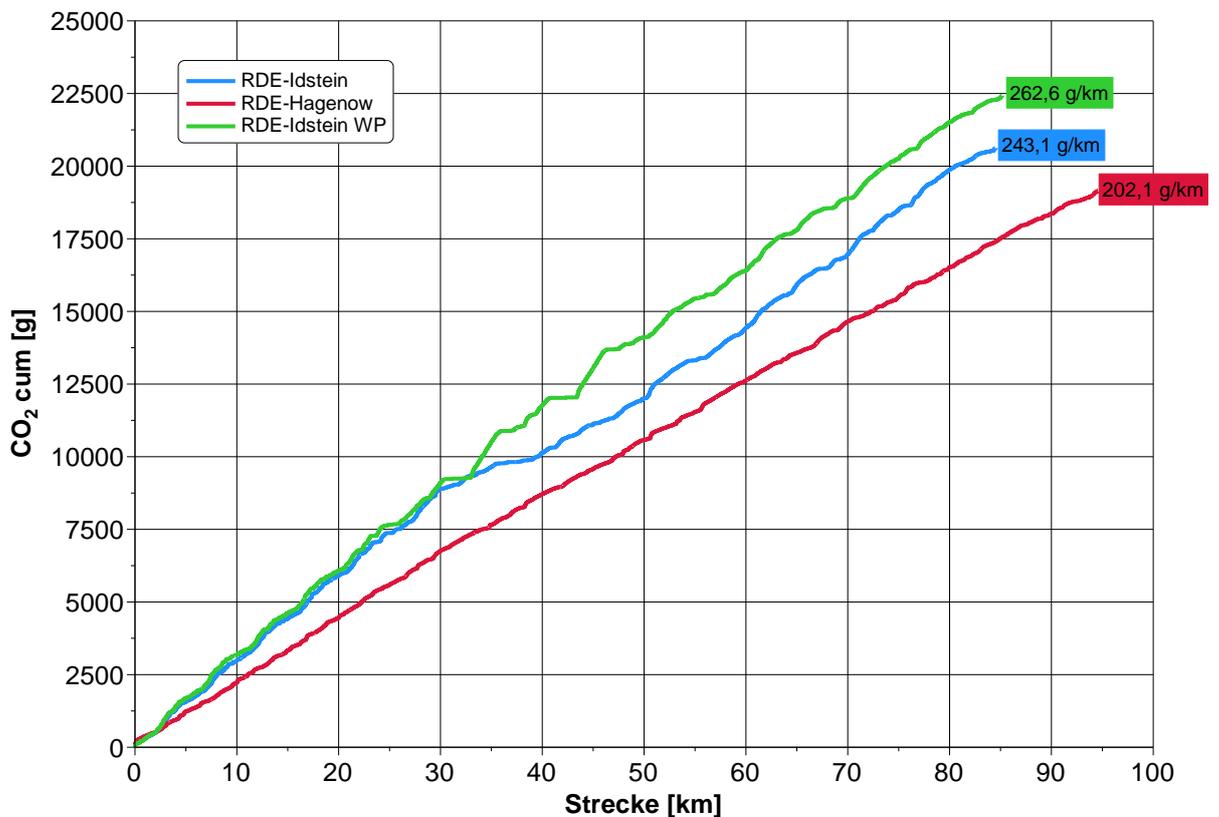


Bild 29: Verlauf der CO₂ Emissionen bei Messfahrt mit unterschiedlicher Steigungsprofilen

Im Überlandbereich zeigen sich die Auswirkung von Steigungen und Gefällen auch bei den CO₂-Emissionen deutlich. Bild 30 zeigt die CO₂-Emissionen im Überlandabschnitt im Detail. Analog zu den Partikelemissionen kann man den Anstieg der CO₂-Emissionen durch den Anstieg der Höhen sehr gut erkennen. Während des Überlandabschnitts des verschärften „RDE Idstein“ über die „Wiesbadener Platte“ wurde ein Durchschnittsverbrauch von 10,6 Liter je 100 Kilometer, bei 263 Gramm CO₂ pro Kilometer gemessen. Bei der regulären Überlandfahrt des „RDE Idstein“ lag der Durchschnittsverbrauch bei 7,8 Liter je 100 Kilometer und 195,3 Gramm CO₂ pro Kilometer. Der Mehrverbrauch im Überlandabschnitt des verschärften „RDE Idstein“ zum regulären gefahrenen „RDE Idstein“ beträgt 26%. Analog zu den Partikelemissionen steigen auch die CO₂-Emissionen des „RDE Idstein“ durch die anfänglichen Anstiege des Streckenverlaufes an und sinken im späteren Verlauf durch den Einfluss der Gefällstrecken. Doch überschreiten die CO₂-Emissionen des RDE Hagenow diesmal nicht die Werte des RDE Idstein. Bei einem Durchschnittsverbrauch während der

Überlandfahrt von 7,8 Liter je 100 Kilometer und einen CO₂ Ausstoß von 195,4 Gramm pro Kilometer sind sie Verbrauchswerte und CO₂ Emissionen annähernd gleich.

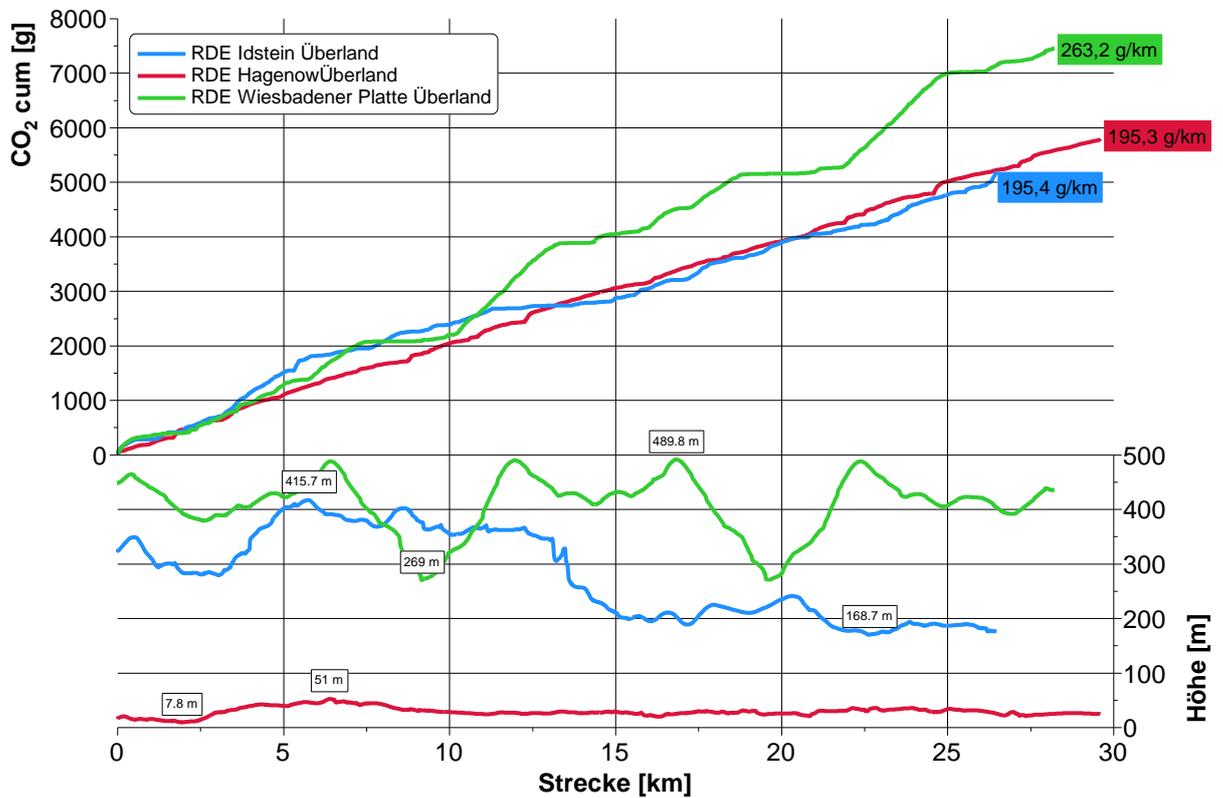


Bild 30: Verlauf der CO₂ Emission im Überlandabschnitt der verschiedenen RDE Messfahrten mit unterschiedlichen Steigungen und dazugehörigen Höhenprofilen

Ein gleichermaßen drastischer Anstieg, wie bei den Partikelemissionen, ist bei den CO₂ Emission nicht ersichtlich. Trotz allem werden auch die Verläufe der CO₂ Emissionen von den Steigungen und Gefällen beeinflusst. Der Anstieg der Partikelemissionen ist vorrangig begründet durch die auf den Motor wirkende Lastanforderung und der daraus resultierenden Einspritzstrategie.

4.4 Einfluss der Fahrdynamik

Der Fahrer des Versuchsfahrzeuges ist direkt mitverantwortlich für die Messergebnisse und gehört zu den größten Einflussfaktoren während einer Messfahrt. Er bestimmt zu jederzeit, sofern keine Vorgaben erfolgen, die Fahrdynamik. Um den Einfluss auf die Fahrdynamik zu untersuchen, wurde der „RDE Idstein“ Fahrzyklus mehrfach mit unterschiedlichen Fahrprofilen absolviert. Untersucht werden sollten für die Vergleiche ein ökonomisches Fahrprofil, ein aggressives Fahrprofil und einer Messung des Fahrzyklus unter den konventionellen Bedingungen. Bei der Durchführung des ökologischen Fahrprofils wurde versucht den für diesen Fahrzyklus geringstmöglichen Kraftstoffverbrauch zu erreichen. Bei der aggressiven Fahrt wurde fahrdynamisch keinerlei Grenzen gesetzt. Hier galten lediglich die gesetzlichen Vorgaben. Ziel dieser Messfahrt war es hohe Werte für $a_{\text{pos}} \cdot v$ zu generieren. Die „Normalfahrt“ ist eine Wiederholung unserer Referenzmessung. Zusätzlich wurden je nach Fahrprofil auch der Fahrmodus des Fahrzeuges gewählt. Während der Normalfahrt emittierte das Fahrzeug $1,39 \cdot 10^{14}$ Partikel. Dies entspricht einem Wert von $1,65 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer. Die ökologische Fahrt „ECO“ ergab einen Wert von $1,63 \cdot 10^{14}$ Partikel, was einem Wert von $1,93 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer entspricht. Die Partikelemissionen der „ECO“-Fahrt waren um 17% höher, als bei der normalen Fahrt. Die aggressive Fahrt „AGGR“ übertrifft die normale Fahrt um 69%, mit einem Wert von $2,39 \cdot 10^{14}$ Partikel. Auf die Strecke gewichtet ergibt sich ein Wert von $2,79 \cdot 10^{12}$ Partikel je gefahrenen Kilometer. Im Bild 31 sind die Partikelverläufe der Messfahrten abgebildet. Die kumulierten Partikelemissionen der Fahrt „ECO“ liegen in der Stadtfahrt annähernd auf gleichem Niveau, wie die Stadtfahrt während des normal gefahrenen Fahrzyklus. Bei der Überlandfahrt liegen die Werte sogar darunter. Nur während des Autobahnabschnittes steigen die Werte stark an. Dies liegt an den hier häufig auftretenden untertourigen Beschleunigungen unter hoher Last, welche durch die vermehrt auftretenden Baustellenabschnitt hervorgerufen wurden. Die Werte wachsen so stark an, dass der Anstieg des Autobahnabschnittes der ECO Fahrt annähernd der aggressiven Fahrt gleicht. Als Resultat überschreitet der Verlauf der Partikelemissionen der „ECO“-Messfahrt den Verlauf des normal gefahrenen Fahrzyklus.

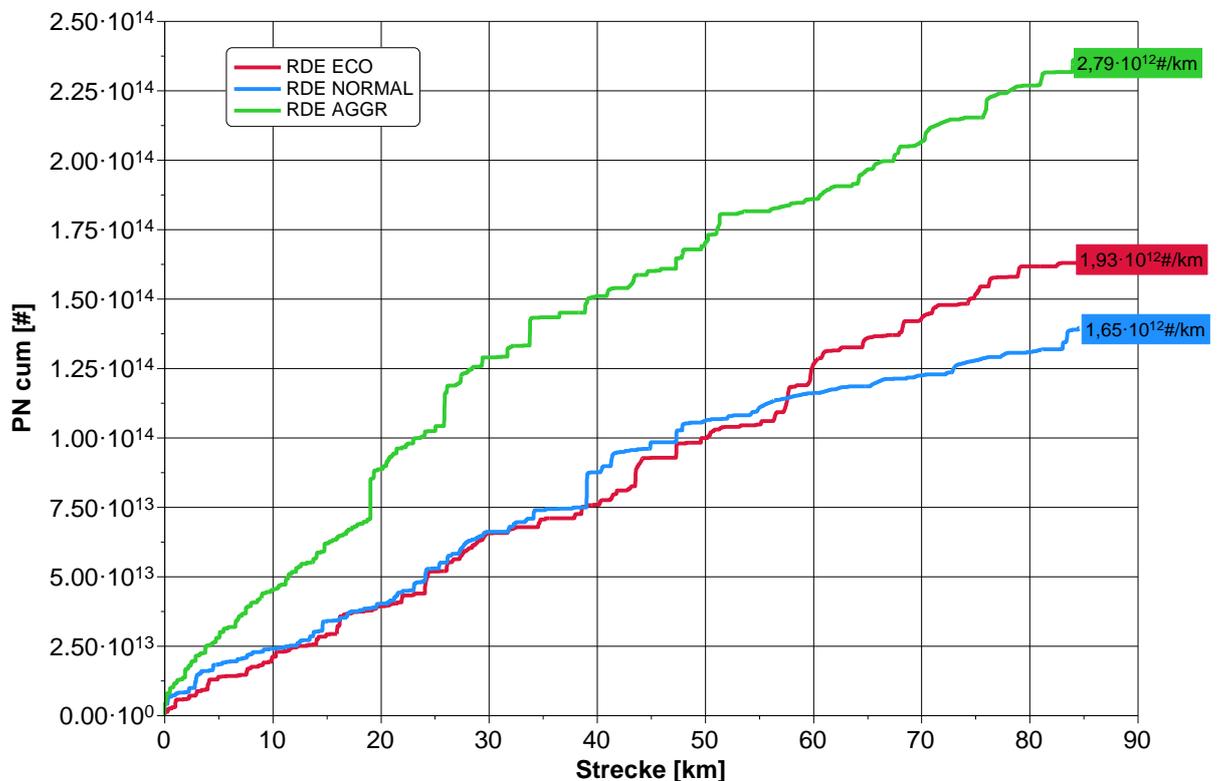


Bild 31: Verlauf der Partikelemission bei unterschiedlicher Fahrdynamik

Die CO₂-Emissionen sind in Bild 32 abgebildet. Erwartungsgemäß liegen die Werte der aggressiven Fahrt deutlich über denen der normalen Fahrt. Die Differenz der Fahrten betrug 27 Prozent. Mit 303,1 Gramm CO₂ je Kilometer und einem Durchschnittsverbrauch von 12,2 Liter je 100 Kilometer zu 239,1 Gramm CO₂ je Kilometer und einem Durchschnittsverbrauch von 9,6 Liter je 100 Kilometer. In der sparsamen ECO-Fahrt wurde 212,0 Gramm CO₂ emittiert, was einen Durchschnittsverbrauch von 8,5 Litern auf 100 Kilometern entspricht. In Summe ist durch den Einfluss der Fahrdynamik eine Differenz von 44 Prozent bei den CO₂-Emissionen möglich.

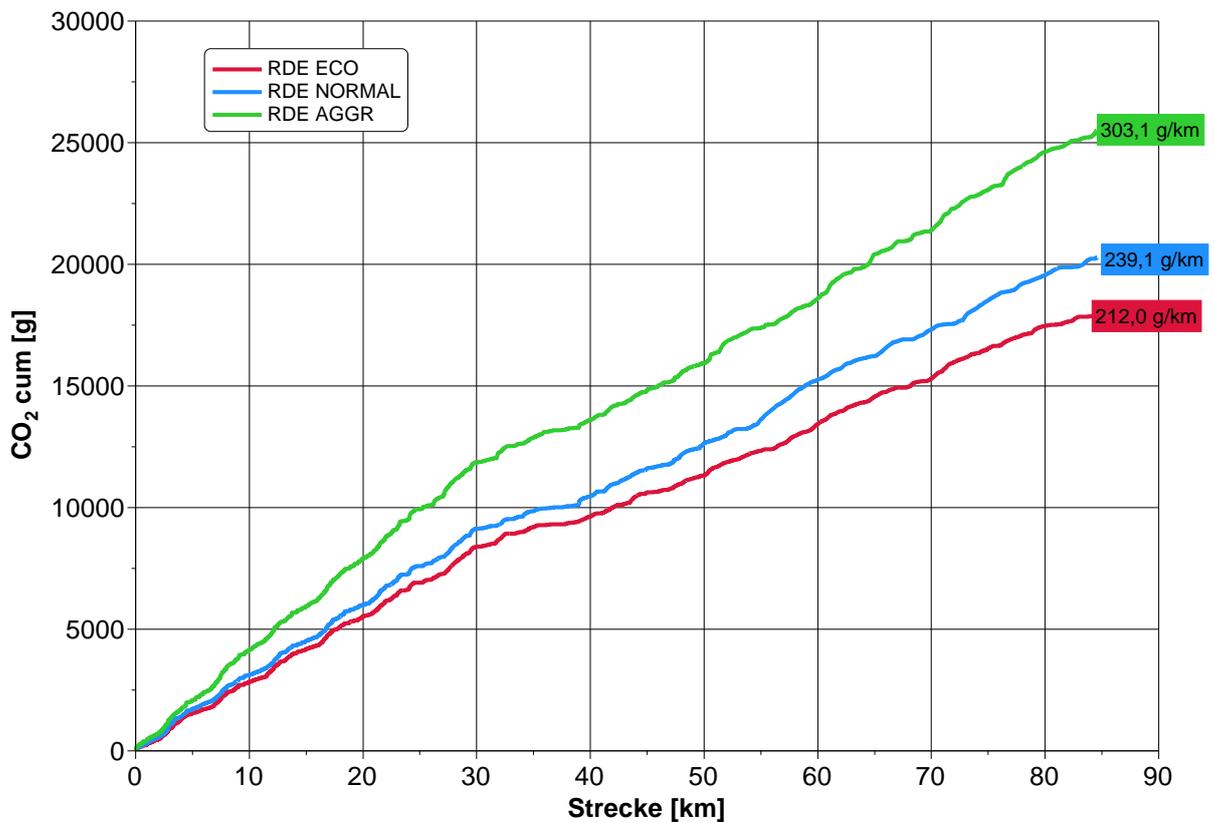


Bild 32: Verlauf der CO₂ Emissionen bei unterschiedlicher Fahrdynamik

Die errechneten Percentile für die Messfahrten sind in Bild 33 abgebildet. Nach der Berechnung aus den Kapitel 3.4.1 erreichte bei der aggressiven Fahrt ein 95 Percentil von $33,5 \text{ m}^2/\text{s}^3$. Die Strecke in der weder beschleunigt noch verzögert wurde beträgt 16km. Bei der normalen Fahrt wurde ein 95 Percentil von $14,3 \text{ m}^2/\text{s}^3$ ermittelt. Die Gleichfahrstrecke betrug 20km. Bei der Fahrt ECO beträgt das 95 Percentil $10,4 \text{ m}^2/\text{s}^3$, bei einer Gleichfahrstrecke von 23,8km. Das Percentil der aggressiven Fahrt wird maßgeblich beeinflusst durch die hohen Beschleunigungen, sowie den mäßigen Beschleunigungen bei höheren Geschwindigkeiten. Dies führt dazu, dass das Percentil der aggressiven Fahrt weiter im Bereich höherer $a_{\text{pos}} \cdot v$ liegt. Im Vergleich dazu liegen die Percentile der ökonomischen und normalen Fahrt nahezu beieinander.

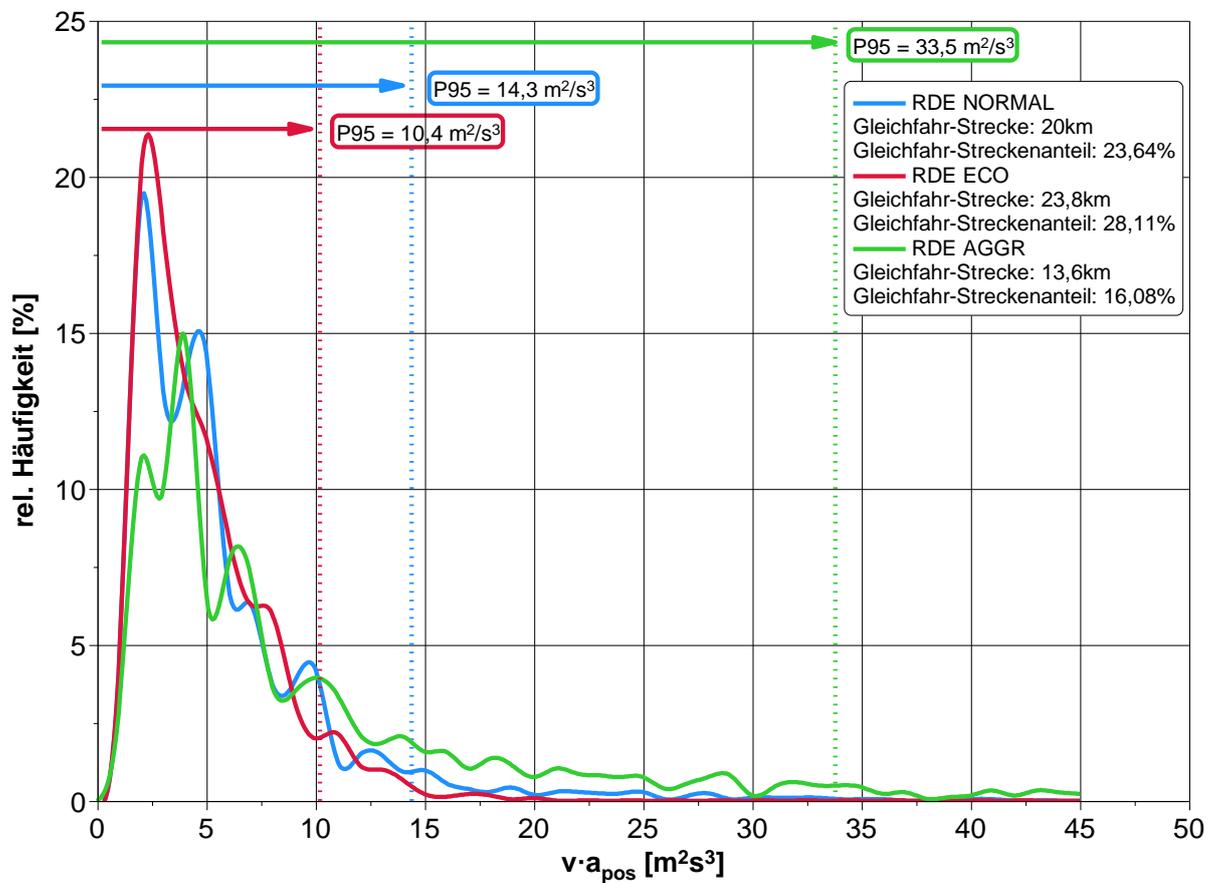


Bild 33: 95 Percentile unter Verwendung unterschiedlicher Fahrprofile

Anhand der Kennfeldaufenthalte im Bild 33 lassen sich die Partikel und CO₂ Emissionen für die aggressive Messfahrt erklären. In Fortsetzung zu der im Kapitel 4.1 getroffenen Aussage, dass ein RDE Entwicklungsfahrzyklus im Grunde einen wesentlich weiteren Bereich des Kennfeldes abdecken kann, ist zu sehen, dass die Messfahrt mit einem aggressiven Fahrprofil fast den kompletten Kennfeldbereich abdeckt. Das Fahrzeug wurde oft in der Volllast bewegt und es wurde sogar die Abregeldrehzahl erreicht. Die meiste Zeit wurde das Fahrzeug in dem Kennfeldbereich bis 5000 min⁻¹ bewegt. In Verbindung mit der dynamischen Auswertung lässt sich erkennen, dass die auf das Fahrzeug wirkenden Beschleunigungen sehr groß waren. Es wurde bei dem Motor zwar der Betrieb mit Lambda „1“ angestrebt, doch wird das Luftkraftstoffgemisch, bei Volllast und bei Lastsprüngen mit niedrigeren Lambdawerten betrieben. Was den Anstieg der CO₂ Emissionen erklärt. Ein höherer Kraftstoffeinsatz resultiert in höhere CO₂ Emissionen. Die bei hohen Lasten auftretende mehrfache Direkteinspritzung begünstigt

wiederum die Entstehung von Partikel. Ähnlich laufen die Vorgänge bei der ökonomischen Fahrt ab. Es wird zwar weniger Kraftstoff während der Messfahrt umgesetzt, trotzdem fördern die Lastsprünge und hohe Lasten die Partikelentstehung. Zu sehen ist dies bei Kilometer 43 und 57. In den Kennfeldaufenthalten ist zu sehen, dass bei der Messfahrt „ECO“ ein kleiner Kennfeldbereich genutzt wird. Die Drehzahl steigt selten über 2300 min^{-1} . Die niedrige Drehzahl in Verbindung mit der Direkteinspritzung ist maßgeblich für die Anstiege der Partikelemissionen bei Kilometer 43 beziehungsweise 57 verantwortlich. Die angesaugt Luftmasse erzeugt in diesen Fällen keine ausreichend großen Turbulenz im Brennraum, um den direkt eingespritzten Kraftstoff homogen mit der Luft vermischen zu können. Es entstehen lokale Gebiete mit fettem Luftkraftstoffgemisch, die die Partikelentstehung sehr begünstigen.

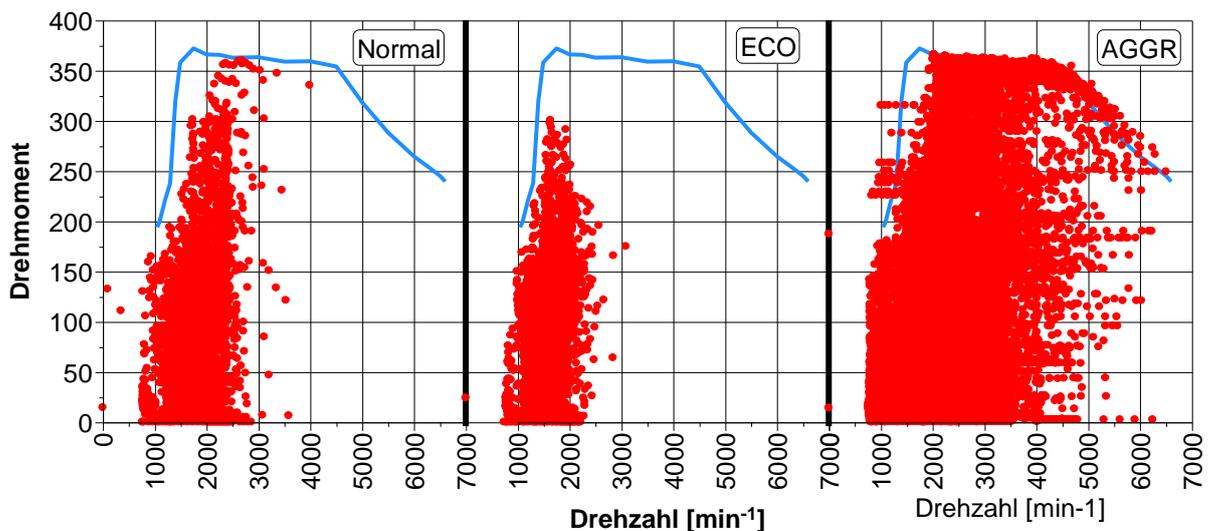


Bild 34: Kennfeldaufenthalte bei unterschiedlichen Fahrweisen

Die im Vorfeld dargestellten Diagrammen zeigen deutlich, wie stark der Einfluss der Fahrtdynamik die Messergebnisse beeinflussen kann. Es sei aber erwähnt, dass die aggressive Fahrt durch die gesetzlichen Regelungen limitiert worden ist. Bei maximaler Ausnutzung des sportlichen Potenzials des Fahrzeug wären durchaus noch höhere Werte für die Partikelemissionen und die CO_2 Emissionen erreichbar gewesen.

4.5 Verunreinigungen im Einspritzsystem

Die von der Gesetzgebung geforderten Nachkontrollen stellen ebenfalls eine neue Anforderung an die Automobilindustrie dar. Diese Prüfungen zur sogenannten „In Use Conformity“ sind für Fahrzeug mit einer Laufleistung von ≤ 160.000 km vorgesehen. So können Alterungen oder Verschmutzungen das Emissionsverhalten des Fahrzeug stark beeinflussen, auch wenn Abgasreinigungssysteme, Zündanlage und notwendige Komponenten der Landungswechseleinrichtung via OBD überwacht werden. In Zukunft setzen die technischen Überprüfungsverbände lediglich Diagnose-Tester für die Kontrolle des Abgassystems im Rahmen der Hauptuntersuchung ein. Im Rahmen der Messkampagne wurde ein massiver Anstieg der Partikelemissionen gemessen. Als Ursache dieser starken Anstiege wurden Verschmutzungen und Ablagerungen an den Einspritzdüsen festgestellt. Um dieses Verhalten zu untersuchen und reproduzieren zu können, wurden die Einspritzventile gereinigt. Nach einer gewissen Motorlaufzeit bei „normaler“ Fahrt wurde wieder ein starker Anstieg der Partikel festgestellt. Die nachfolgenden Messungen wurde dann unter annähernd gleichen Bedingungen absolviert, um so die Einflüsse der verunreinigten Einspritzdüsen näher zu untersuchen. Das Bild 35 zeigt, dass die CO₂-Emissionen alle hier verglichenen Messfahrten annähernd gleich bleiben. Die Referenzmessung soll in diesem Vergleich als Ausgangspunkt dienen. Es ist zu sehen, dass unsere Referenzfahrt den höchsten CO₂-Wert erreicht. Bei dieser Messfahrt wurde ein Testverbrauch von 9,7 Liter auf 100 Kilometer ermittelt. Die Kohlenstoffdioxidemissionen lagen bei 243 Gramm pro Kilometer. Die vier aufeinanderfolgenden Messfahrten wurden alle, wie oben beschrieben, annähernd bei gleichen Bedingungen durchgeführt. Dies ist im Verlauf der CO₂-Emissionen ersichtllich. Der Verlauf der CO₂ Emissionen bei Messfahrten mit verunreinigten Einspritzventilen liegen nahezu aufeinander und streuen zum Ende hin leicht. Die erzielten Durchschnittsverbräuche lagen dabei zwischen 9 und 9,2 Liter je 100 Kilometer.

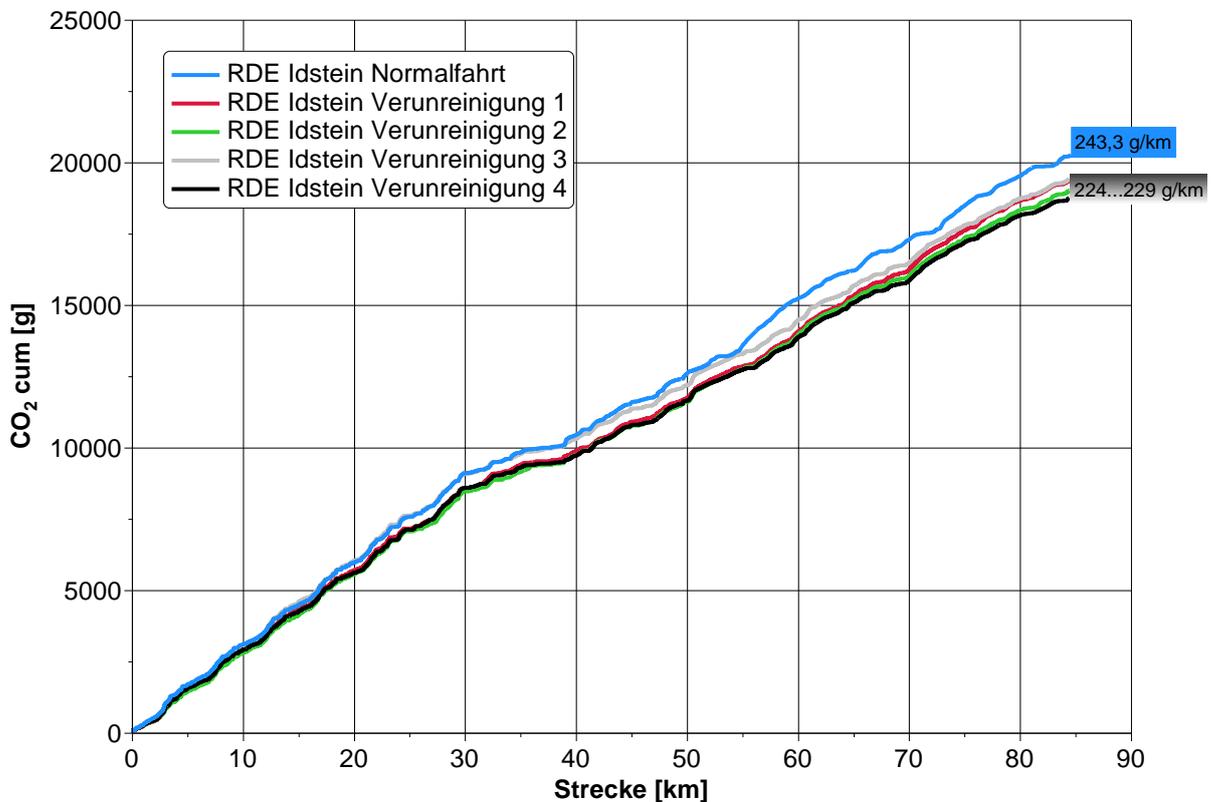


Bild 35: Verlauf der CO₂ Emissionen bei verunreinigten Einspritzventilen

Die Partikelemissionen stiegen nach jeder Fahrt massiv an. Zu sehen ist dies im Bild 36. Unsere Referenzfahrt erzeugt einen Partikelaustritt von $1,53 \cdot 10^{12}$ Partikel pro Kilometer. Der Grenzwert der Euro6c für Partikelemissionen ist ebenfalls im Diagramm eingetragen worden. Nun ist aus dem Kapitel 3.5 schon bekannt, dass für unsere Referenzfahrt ein CF-Wert von 2,6 benötigt werden würde. Die erste Messfahrt mit den verunreinigten Einspritzdüsen erzeugte einen Partikelaustritt von $4,12 \cdot 10^{12}$ Partikel pro Kilometer. Das entspricht einem benötigten CF-Wert von 4,1. Dies ist eine Steigerung von 170%. In den darauf folgenden Messungen steigen die Werte der Partikelemission jeweils nochmal um 20-30% an. In der letzten Messfahrt erreichten wir einen Spitzenwert von $6,6 \cdot 10^{12}$ Partikel pro Kilometer, was dem elffachen des Euro6c Grenzwertes entspricht. In Vergleich zu unserer Referenzmessung bedeutet das einen Anstieg von 331%. Weitere Messfahrten mit den Einspritzdüsen zeigten keine weitere Steigerung der Partikelemission. Die Partikelemissionen blieben zu diesem Zeitpunkt annähernd konstant. Während dieser Untersuchung war es leider nicht möglich eine Gas-PEMS in den Messbetrieb zu integrieren. Dadurch war es unmöglich zu überprüfen,

ob die Partikelanzahl wirklich rein aus Partikel bestand oder noch volatile Bestandteile Einfluss auf die Messergebnisse hatten. Eine Messung der Kohlenwasserstoffe hätte eventuell Aufschluss darüber geben können. Während dieser Versuchsreihe wurden keinerlei Fehlereinträge in das Motorsteuergerät abgelegt. Auch zeigten die Lambdasonden keinerlei ungewöhnlichen Veränderungen. Es liegt nahe, dass sich durch die Ablagerungen an der Einspritzdüse, das Strahlbild der Düsen geändert hat. Diese Veränderung beeinflusst den Verbrennungsprozess. Kraftstofftropfen bleiben am Injektor hängen und bilden eine zusätzliche Partikelquelle. Die Verschmutzung der Einspritzdüsen kann im Rahmen der gesetzlichen Nachkontrolluntersuchung zu einem nicht bestehen der Fahrzeuges führen. In diesem Vergleich wurden ein drastischer Anstieg der Partikelemissionen ermittelt. Diese werden im Zuge der neuen Abgasgesetzgebung einen neuen Grenzwert haben. Der Grenzwert sinkt von momentanen $6,0 \cdot 10^{12}$ Partikel pro Kilometer auf $6,0 \cdot 10^{11}$ Partikel pro Kilometer.

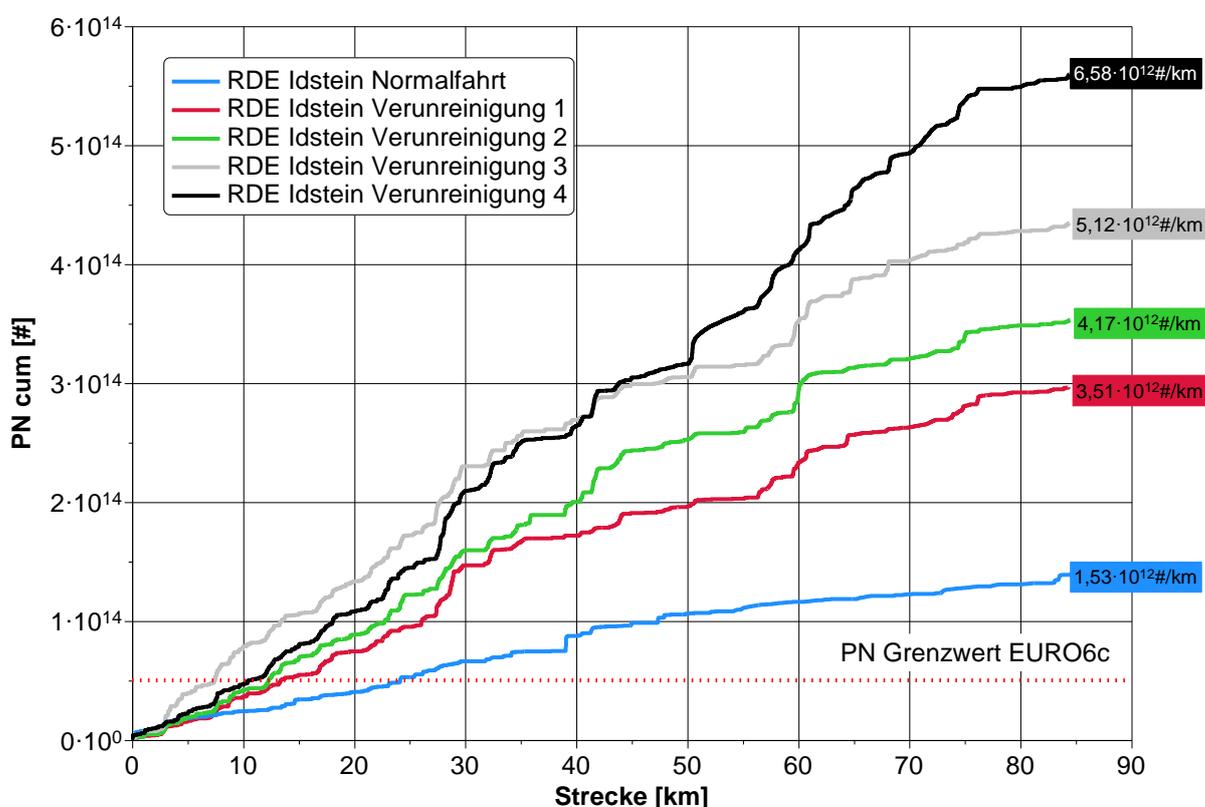


Bild 36: Partikelemissionen bei verunreinigten Einspritzventilen

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Mit Einführung der RDE-Gesetzgebung wird sich die Prozesse der Fahrzeugabstimmung und Fahrzeugzertifizierung erheblich verändern. Die Automobilehersteller sind aufgefordert ihre Fahrzeuge unter realen Testbedingungen während einer Straßenmessung zu zertifizieren. Zusätzlich dazu muss, im Vorfeld noch, ein von der Europäischen Kommission entwickelter neuer Fahrzyklus auf dem Rollenprüfstand absolviert werden. Dieser beinhaltet neben einem neuen Fahrprofil mit höherer Dynamik, auch gesteigert Anforderungen im Bereich der Testparameter und Rahmenbedingungen. Eine Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit lässt sich dadurch lediglich auf den Rollenprüfstand erreichen. Diese Randbedingungen der RDE-Testprozedur befinden sich derzeit in der Diskussion zwischen der EU-Kommission und den Verbänden der Automobilindustrie.

Neben der Zertifizierung von Neufahrzeugen werden auch Prüfungen zur sogenannten „In Use Conformity“ vorgesehen. Jedes Fahrzeug mit einer Laufleistung von bis zu 160.000 km kann also zukünftig zu einer RDE-Überprüfungsfahrt herangezogen werden.

In den vorhergehenden Untersuchungen wurden die Einflüsse von Starttemperatur, Steigung, Fahrdynamik und des Einspritzsystems herausgearbeitet, die einen deutlichen Einfluss auf die PN-Emission haben können. Je nach Temperatur, Topographie und Fahrdynamik können sich die PN-Emissionen eines Euro6-Fahrzeuges erheblich ändern. Eine deutliche Steigerung ergaben die altersbedingten Verschmutzungen an Einspritzsystem. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass bei der zukünftigen Fahrzeugabstimmung ein größerer Sicherheitsabstand zu den RDE-Grenzwerten eingehalten werden muss, als zu den Rollengrenzwerten des WLTP. Dies ist im Übrigen auch der Grund dafür, warum derzeit für den ersten Schritt der RDE-Einführung relativ hohe Konformitäts-Faktoren von 3,5 oder mehr diskutiert werden.

Um die Umsetzung der RDE-Gesetzgebung realisieren zu können, müssen

- die Randbedingungen
- das PN-Messverfahren
- die Konformitätsfaktoren aller Abgasemissionen

festgelegt werden. Eine einjährige „Monitoring“-Phase, in der die Hersteller gehalten sind, RDE-Messfahrten durchzuführen und an das KBA zu melden, beginnt 9/2016. Ein Jahr später ist seitens der Kommission die verbindliche Festschreibung der Gesetzgebung geplant. In der Automobilindustrie bezweifelt man jedoch das dieser Termin eingehalten werden kann.

Es ist in naher Zukunft erwarten, dass die Automobilhersteller und Tier1-Zulieferer sich darauf konzentrieren, mit Messfahrzeugen unterschiedlichste RDE-Fahrzyklen zu erproben und aufzuzeichnen, um so Datenbank-Bibliotheken zu schaffen und als Vorlagen für synthetische Tests am dynamischen Motor-Prüfstand heranziehen zu können. So lassen sich fernab der Straßenmessung trotz allem reproduzierbare Ergebnisse erzielen. Diese Ansatz soll helfen die Zeit der Bauteilentwicklung vor allem im Bereich der „Gasoline Particle Filter“ zu verkürzen. Ausgehend von den vorliegenden Untersuchungen wird die Automobilindustrie, die Entwicklung dieser Filter intensivieren müssen.

Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinie 70/220/EWG
- [2] WLTP-2013-027 Consolidated Draft GTR 26.08.2013
- [3] EC XXX, 2015-03 : RDE Draft 03/2015 ;TCMV
- [4] Legislation Timeline; 2015/04; K. Engeljehring
- [5] RDE 2nd Package Skeleton V3; 2015/07 ; TCMV
- [6] „Transfer functions" in the European RDE legislation: to be or not to be?; 2015/09; TCMV
- [7] Transfer Function delays and weakens the RDE test procedure; 2015/09; Francois Cuenot
- [8] Erprobte PEMS Messtechnik zur Erfüllung der Homologation und Entwicklung auf der Straße für PKW, LKW und Arbeitsmaschinen; 04/2015; M. Krüger
- [9] Technische Daten Audi A5 Sportsback 2.0 TFSI Quattro; 04/2014; Audi AG
- [10] SSP 606; 2014; Audi AG
- [11] Technische Produktinformation LSU 4.2; 02/2006; Robert Bosch GmbH
- [12] Konstruktion von Verbrennungsmotoren, 2006, Künscher/Hoffmann
- [13] Application Guide AVL PARTICLE COUNTER; 2011/03; B. Giechaskiel, H. Joergl, S. Jache, M. Krueger

- [14] Comparison of particle number measurements from the full dilution tunnel, the tailpipe and two partial flow systems; 2010/01; Barouch Giechaskiel, Massimo Carriero, Giorgio Martini, Alexander Bergmann, Helmut Pongratz, Herwig Jörgl
- [15] Aerosol Measurement by Induced Currents; 2014/01; Martin Fierz, Dominik Meier, Peter Steigmeier, Heinz Burtscher b
- [16] Accuracy of Particle Number Measurements from Partial Flow Dilution Systems; 2011/09; Barouch Giechaskiel, Wolfgang Schindler, Herwig Jörgl, Verena Vescoli, Alexander Bergmann
- [17] Aufbau einer fahrzyklischfähigen Simulationsmethodik zur Modellierung der Partikelemissionen direkteinspritzender Ottomotoren; 09/2015; S. Fromater, J. Neumann, C. Hasse
- [18] Übersicht Messunsicherheiten; 10/2015; Christian Riedel
- [19] Median oder Mittelwert?; 2007; S. Lange, R. Bender