

# Partikelanzahlmessung in der Periodisch Technischen Inspektion (PTI) von Benzinfahrzeugen

## Einleitung

Es ist allgemein bekannt, dass Feinstaub negative Auswirkungen auf die Gesundheit hat [1]. Für die Gesundheit spielen die sogenannten Nanopartikel mit einem Partikeldurchmesser kleiner als 100 nm die größte Rolle, da sie am tiefsten in den Körper eindringen können [2]. Der Verkehrssektor ist für einen großen Teil der Emissionen von Nanopartikeln verantwortlich. Dabei ist aus diversen Studien bekannt, dass ein kleiner Anteil der Fahrzeugflotte, sogenannte „High Emitter“, für einen Großteil (bis zu 90 %) der gesamten Partikelemissionen der Fahrzeuge verantwortlich sind [3,4,5,6]. Eine gezielte Maßnahme zur Identifizierung dieser „High Emitter“ ist die Partikelanzahlmessung bei der periodischen technischen Inspektion (PTI) der Fahrzeuge. Die Partikelanzahlmessung von Dieselfahrzeugen im Rahmen der PTI wurde in Deutschland, Belgien, den Niederlanden und der Schweiz erfolgreich eingeführt. Dieselfahrzeuge mit defektem Dieselpartikelfilter (DPF) werden bei der Partikelanzahlmessung identifiziert und aus dem Verkehr gezogen [3]. Durch diese Maßnahme trägt die Einführung der Partikelanzahlmessung in erheblichem Maße zur Verbesserung der Luftqualität bei [3].

Die Ergebniszahlen dieser Messung aus den ersten beiden Jahren zeigen, dass High-Emitter Fahrzeuge mit dieser Messmethode effektiv detektiert werden, und dass eine OBD-Prüfung diesen Zweck keinesfalls erfüllen kann. Im Jahr 2024 haben in Deutschland 132 611 Dieselfahrzeuge die Abgasuntersuchung nicht bestanden, was einer Durchfallquote 2,95% entspricht. Nur bei 0,29% der Fahrzeuge wurde ein Problem vom OBD-System angezeigt. Deutlich über zwei Drittel der High-Emitter hätten bei einer reinen OBD-Prüfung die AU bestanden, obwohl der DPF nachweislich defekt ist [7]. In Belgien, wo zusätzlich auch EURO5 Fahrzeuge vermessen werden, hätten mit einer OBD-Prüfung sogar ca. 97% der High-Emitter Fahrzeuge bestanden. Dies zeigt eindeutig, dass eine Partikelanzahlmessung am Endrohr die einzig valide Methode zur Detektion eines DPF-Defektes ist, und nicht durch eine OBD-Funktionsprüfung ersetzt werden kann [8,9].

Ähnlich wie bei der Überprüfung des Dieselpartikelfilters (DPF) bei Dieselfahrzeugen ist es sinnvoll, eine Überprüfung des Otto-Partikelfilters (OPF) durchzuführen. Neue Benzinfahrzeuge mit Direkteinspritzung (Gasoline Direct Injection, GDI) zeigen ein zum Diesel sehr ähnliches Partikelemissionsverhalten, weshalb für diese Fahrzeuge seit 2017 auch dieselben Partikelanzahl Grenzwerte für die Typenzulassung gelten<sup>1</sup>. Diese Grenzwerte sind für GDI- Fahrzeuge nur mit einem OPF einzuhalten, weshalb weshalb die Überprüfung der OPF-Funktionalität ebenfalls im Rahmen der PTI erfolgen muss.

---

<sup>1</sup> Eine Übersicht der Typenzulassungsgrenzwerte für alle Fahrzeug und Treibstoffklassen ist auf Dieselnet.com ersichtlich: <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php#stds>

Neue Studien zeigen, dass eine Gut-Schlecht Unterscheidung auch für Benzinfahrzeuge im Rahmen einer Leerlaufmessung erfolgen kann [10]. Es gibt allerdings für Benzinfahrzeuge einige Aspekte zu beachten, die bei der Einführung einer solchen Messung beachtet werden müssen.

## Aspekte bei der Messung von Benzinfahrzeugen

### 1) Partikelgrößenverteilung

Bei der Abgasmessung am Endrohr von Benzinfahrzeugen treten im Allgemeinen kleinere Partikelgrößen auf als bei Dieselfahrzeugen [11,12,13, 14]. Zudem kann die Partikelgrößenverteilung bimodal sein. Das bedeutet, dass neben den Rußpartikeln (Accumulation Mode) auch kleinere Partikel unter 23 nm Partikelgröße (sog. Sub-23 nm Partikel) in hoher Konzentration in Form von flüchtigen Partikeln (Nucleation Mode) oder festen Partikeln (Core Mode) [15] auftreten.

Ein sehr relevanter Aspekt beim Benziner ist, dass Sub-23 nm Partikel in relevanter Anzahlkonzentration nicht bei einem intaktem OPF auftreten, da diese ansonsten effektiv im Filter entfernt werden [14].

### 2) Messprozedur und Grenzwert

Beim Diesel funktioniert die Unterscheidung zwischen gutem und schlechtem Dieselpartikelfilter bei einer Leerlaufmessung im Low-Idle Zustand. Bei intaktem DPF liegt die Konzentration deutlich unter  $50\,000\text{ cm}^{-3}$ , während bei einem defekten DPF die Konzentrationen deutlich über  $1\,000\,000\text{ cm}^{-3}$  liegen können. Zwischenwerte im Bereich des Grenzwertes können z.B. bei bereits vorgeschädigten Systemen auftreten, welche unterschiedliche Ursachen haben können.

Beim Benziner hängen die Konzentrationen sehr vom Lastzustand ab und können auch bei der Leerlaufmessung deutlich variieren. Des Weiteren ist die Korrelation der Partikelanzahlkonzentrationen zwischen idle-Messung und einer Homologationsmessung im Vergleich zu Dieselfahrzeugen reduziert [16].

### 3) Volatile Partikel

Flüchtige Partikel treten sowohl bei Diesel- als auch bei Benzinfahrzeugen auf, allerdings ist das Auftreten dieser Nukleationsmode nicht reproduzierbar und hängt von vielen Parametern ab. Falls eine Nukleationsmode auftritt, liegt die Partikelgröße in der Regel unter 23 nm, und die Partikelanzahl dominiert gegenüber den festen Rußpartikeln der Akkumulationsmode.

Die flüchtigen Partikel dieser Mode beinhalten jene gefährlichen Stoffe, die beim Eindringen in den menschlichen Organismus schädlich wirken (z.B. Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe, PAHs). Diese volatilen Partikel werden beim Austritt aus dem Auspuff allerdings stark verdünnt und können wieder in die Gasphase übergehen, sodass sie in der Regel nicht in den Atemwegen anlagern. Wenn sich diese Stoffe jedoch an den festen Rußpartikeln der Akkumulationsmode adsorbieren, können sie mit dem Ruß in die Atemwege gelangen und dort schädlich wirken. Ohne die festen Rußpartikel sind die volatilen Partikel ungefährlich, weshalb es wichtig ist, Rußpartikel mittels Partikelfilter zu entfernen.

**Übrigens:** Ein intakter Partikelfilter erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass eine bei Nukleationsmode nach dem Filter auftritt, da aufgrund der Abwesenheit von Rußpartikel die flüchtigen Stoffe nicht am Rußpartikel kondensieren, sondern via

homogener Nukleation Tröpfchen formen können. Diese Tröpfchen verflüchtigen sich dann wieder beim Austritt in die Umgebung.

#### 4) Feuchtigkeit

Ein weiterer Aspekt bei der Messung von Benzinfahrzeugen ist eine erhöhte Abgasfeuchte und damit eine etwas erhöhter Taupunkt als bei Dieselfahrzeugen. Dies kann zur Kondensation der Abgasfeuchte und damit einhergehenden Problemen, wie z.B. Falschmessung oder Geräteschäden führen. Speziell im Kaltstart kann es vermehrt zu verstärkter Kondensation kommen [17], weshalb eine Partikelmessung stets bei temperierten Fahrzeugen durchgeführt werden sollte.

#### 5) Funktionsweise Benzinpartikelfilter

Obwohl die grundlegenden Filtrationsmechanismen - Diffusion bei sehr kleinen Partikeln sowie Interception und Impaktion bei größeren Partikeln - in Diesel- und Ottopartikelfiltern identisch sind, unterscheidet sich das Betriebsverhalten zwischen OPF und DPF deutlich.

Aufgrund der deutlich höheren Abgastemperaturen im Ottomotor erreichen OPFs häufig ein thermisches Niveau, das eine passive Regeneration ermöglicht. Diese Regeneration erfolgt meist während natürlicher Schubabschaltungen, bei denen hohe Sauerstoffkonzentrationen und ausreichend Temperatur anliegen. Durch die insgesamt geringeren Rußmengen der GDI-Fahrzeuge bildet sich im OPF nur eine dünne, wenig stabile Rußschicht. Diese kann sich, je nach Temperatur im OPF, aufbauen oder mittels passiver Regeneration wieder abbauen [18].

### 10 nm vs. 23 nm: Was spricht dafür, Partikel unter 23 nm nicht mitzumessen?

- **Sub-23 nm Partikel werden effektiver abgeschieden**

Partikel werden im Partikelfilter über mehrere Mechanismen abgeschieden. Große Partikel ( $\geq 100$  nm) gehen aufgrund deren Massenträgheit durch Impaktion und Interception verloren. Kleine Partikel ( $\leq 100$ ) nm gehen aufgrund ihrer Diffusionsbewegung im Filter verloren. Dabei gilt, je kleiner die Partikel sind, desto größer ist ihre Diffusionsbewegung und damit die Filterwirkung. Damit ist die Filterwirkung für 10 nm große Partikel größer als für 23 nm große Partikel. Durch die größere Filtereffizienz bei sehr kleinen Partikeln sind die Sub-23 nm Emissionen bei Fahrzeugen mit Partikelfilter vernachlässigbar. Beim Benzinmotor treten, wie oben erwähnt, Sub-23 nm Partikel nur bei defektem OPF in relevanter Anzahl auf, da diese ansonsten effektiv im Filter entfernt werden [14]. Dies gilt prinzipiell, auch wenn kleinere Schäden (Risse) in den Partikelfiltern vorhanden sind. Für die Messung ist daher ein Cut-Off von 23 nm für das Messgerät völlig ausreichend.

**Übrigens:** Rußpartikel im Abgas von Diesel und Ottomotoren weisen eine Größe von um die 100 nm auf (ca. 20 – 200 nm). Partikel mit dieser Größe haben die geringste Verlustwahrscheinlichkeit für beide Mechanismen (Diffusion und Impaktion), weshalb sie auch am tiefsten in die menschlichen Atemwege eindringen können. Genau dieser Effekt macht die Abgaspartikel, wie oben erwähnt, so gefährlich.

- **Sub-23 nm Partikel reduzieren die Reproduzierbarkeit der Messung durch Auftreten der Nukleationsmode**

Wie oben erwähnt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass homogene Nukleation auftritt bei einem Fahrzeug mit Partikelfilter höher als bei einem Fahrzeug ohne Partikelfilter, da keine Partikel nach dem Filter vorhanden sind, welche die volatilen Komponenten "aufnehmen". Diese volatilen Partikel, erzeugt durch homogene Nukleation, sind in der Regel sehr klein ( $< 23 \text{ nm}$ ) und können zu Messartefakten führen, wenn nicht eine sehr aufwändige und teure Technologie zur Abscheidung dieser Partikel angewandt wird (z.B. Catalytic Stripper mit Sulfur Trap). Für PTI-Equipment kann dies entweder zu Artefakten führen oder signifikante Kostenerhöhung verursachen.

- **Sub-23 nm Partikel erhöhen die Komplexität in der Typenzulassung der Geräte**

Partikelzähler für die PTI müssen im Rahmen der Typenzulassung bzgl. ihrer Zähleffizienz überprüft werden. Diese Überprüfung erfolgt mit monodispersen Partikeln bei bestimmten, spezifizierten Partikelgrößen, wobei der Zähler gegenüber einer Referenz mit deutlich niedrigerer Cut-Off Größe (z.B.  $10 \text{ nm}$ ) gemessen wird (der Referenzzähler hat dabei bei allen überprüften Partikelgrößen Zähleffizienz von 100%). Bei den aktuellen Geräten mit einem  $23 \text{ nm}$  Cut-Off erfolgt die Überprüfung bei  $23 \text{ nm}$ ,  $30 \text{ nm}$ ,  $50 \text{ nm}$ ,  $70 \text{ nm}$ ,  $100 \text{ nm}$  und  $200 \text{ nm}$ . Bei der Cut-Off Größe von  $23 \text{ nm}$  müssen die Partikelzähler eine Zähleffizienz zwischen 20% und 60% einhalten. Der geforderte Messbereich für PTI-Partikelzähler liegt zwischen  $5\,000$  und  $5\,000\,000 \text{ cm}^{-3}$ . Dies bedeutet, dass bei der Cut-Off Größe von  $23 \text{ nm}$  die Überprüfung mit einer Mindestkonzentration von mindestens  $25\,000 \text{ cm}^{-3}$  ( $5\,000$  sind 20 %) erfolgen müsste, damit der PTI-Partikelzähler noch in seinem Messbereich messen kann. Tatsächlich ist es sehr schwierig, monodisperse Rußpartikel mit einer Größe von  $23 \text{ nm}$  in genügend hoher Konzentration zu erzeugen und für eine Zähleffizienzmessung mit vernünftiger Messunsicherheit aufzubereiten (siehe Doppelladungskorrektur, etc.). Die aktuelle Überprüfung geschieht daher bei Konzentrationen deutlich unter dem erforderlichen Wert von  $25\,000 \text{ cm}^{-3}$ , wodurch sich bestimmte Gerätespezifikationen in sich widersprechen (z.B. PTB-A 12.16). Für eine Zähleffizienzmessung bei  $10 \text{ nm}$  ist die Situation noch um einiges problematischer, da die Erzeugung von monodispersen Rußpartikeln mit  $10 \text{ nm}$  in entsprechenden Konzentrationen noch deutlich schwieriger ist. Deshalb müssten die Partikelzähler eine deutlich geringere Ansprechschwelle im Bereich von unter  $500 \text{ cm}^{-3}$  aufweisen. Die Partikelzähler für  $10 \text{ nm}$  müssten daher eine 10 mal niedrigere Ansprechschwelle haben, als derzeit spezifiziert. Zudem bräuchte es metrologisch rückgeführte Referenzen mit einer Cut-Off Größe deutlich unter  $10 \text{ nm}$ . Derartige Verfahren müssten zunächst aufwändig in den einschlägigen Metrologieinstituten entwickelt und einem CMC Verfahren validiert werden. Dies dauert typischerweise einige Jahre.

- **Beim Messen von Sub-23 nm Partikel können Artefakte in Form einer „Core-Mode“ auftreten**

Selbst wenn die volatilen Partikel unter  $23 \text{ nm}$  effektiv entfernt wurden, können speziell beim Kaltstart von Benzinfahrzeugen sog. Core-Mode Partikel auftreten. Dabei handelt es sich um feste (also nicht flüchtige) Partikel mit einer Größe unter  $23 \text{ nm}$  in hoher Anzahlkonzentration. Dies kann schon bei Geräten mit einem  $23 \text{ nm}$  Cut-Off, welche alle die gängigen Zähleffizienzanforderungen für PTI-Equipment erfüllen, zu enormen

Messabweichungen zwischen den Geräten führen [15]. Für Geräte mit einem 10 nm Cut-Off wäre dieser Effekt noch ausgeprägter. Der Grund für die Messabweichungen liegt in unterschiedlichen Steigungen in der sog. Cut-Off Kurve, welche charakteristisch für das jeweilige Gerät ist. Dies gilt für beide gängigen Sensortechnologien, CPC und DC. Beim CPC besteht eine starke Abhängigkeit vom Partikelmaterial und der Fluidodynamik im Kondensor, während beim DC-Verfahren die Aufladung und darauffolgende Detektion von kleinen Partikeln zunehmend schwierig ist.

- **Hohe Verluste von Sub-23 nm Partikel in der Probenahme erhöhen die Messunsicherheit deutlich**

Die Verluste im Sub-23 nm Bereich sind durch Diffusion sehr hoch und es kann nur durch aufwändige und kostspielige Messtechnik (PMP) sichergestellt werden, dass die Verluste möglichst gering sind. Durch die Probeentnahme kommen bei PTI Geräten nur ein kleiner Teil (~10 %) der 10 nm Partikel überhaupt bei der Sensorik an, was zu einer erhöhten Messunsicherheit führt.

## Standpunkt von AVL DiTEST

Die Messung von Benzinfahrzeugen ist aus Umweltgesichtspunkten zielführend und sollte flächendeckend im Rahmen der PTI eingeführt werden. Dies ist mit den bestehenden Partikelzählern für Dieselfahrzeuge grundsätzlich möglich. Es besteht noch weiterer Forschungs- und Validierungsbedarf, was die Belastbarkeit der Messprozedur betrifft, dieses Thema scheint jedoch aus unserer Sicht lösbar. Bei der Frage der Partikelgröße, nämlich ob Sub-23 nm Partikel gemessen werden sollten, ergeben sich aus unserer Sicht große Probleme vor allem im Bereich der metrologischen Zulassung, an denen die Einführung einer Partikelmessung für Benzinler letztendlich scheitern kann. Das heißt nicht, dass es technologisch nicht möglich ist – wir können mit unserem DC basierten Partikelzähler die Zähleffizienzanforderungen eines 10 nm Partikelzählers gemäß der vorgeschlagenen RDE EURO7 Norm erfüllen – es macht aber aus unserer Sicht die Einführung der Messung komplizierter und somit unwahrscheinlicher. Daher plädieren wir dafür, dass man sich den eigentlichen Messzweck in den Fokus stellen sollte, nämlich der Überprüfung des Partikelfilters.

## Q&A

### *Warum macht die Partikelmessung beim Benziner Sinn?*

Der Anteil von Benzinfahrzeugen an der Verbrennerflotte steigt durch den hohen Anteil von Hybridfahrzeugen sowie die hohen Absatzzahlen reiner Benzinfahrzeuge. Moderne Benziner emittieren ebenso gefährliche Nanopartikel wie Dieselfahrzeuge. Aufgrund des großen Flottenanteils und der Einführung des Dieselpartikelfilters werden Benziner in Zukunft einen größeren Anteil an den Ultrafeinstaubemissionen haben als Diesel [19,20]. Mit der Einführung der Abgasnorm Euro 6c für Direkteinspritzer bzw. ab Euro 7 für alle Benzinfahrzeuge wurde das Limit der Partikelanzahl für die Typenzulassung für alle auf den gleichen Grenzwert wie für Diesel festgelegt. Daher ist die Verwendung eines Partikelfilters notwendig, um die Grenzwerte einzuhalten. Ähnlich wie beim Dieselpartikelfilter muss die Funktionalität des Abgasnachbehandlungssystems bzw. die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte über die gesamte Lebensdauer hinweg gewährleistet sein, was regelmäßige Prüfungen erfordert.

### *Kann der Partikelfilter auch durch eine OBD-Funktionsprüfung getestet werden?*

Die Ergebnisse der PN-Messung in Deutschland und Belgien belegen eindeutig, dass die Funktionalität des Partikelfilters nur mit einer Partikelanzahlmessung überprüft werden kann. In Deutschland wären 90 % und in Belgien 97 % der defekten Dieselpartikelfilter bei einer reinen OBD-Prüfung nicht entdeckt worden. Das bedeutet, dass eine OBD-Funktionsprüfung nicht dazu geeignet ist, defekte Partikelfilter festzustellen [8, 9].

### *Warum ist die PN-Messung für Benzinfahrzeuge komplizierter als beim Diesel?*

Bei Dieselfahrzeugen lässt sich mittels PN-Messung im Leerlauf eine verlässliche Unterscheidung zwischen intaktem und defektem DPF treffen, da sich die Partikelanzahl typischerweise um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor 100) unterscheidet. Studien für Benziner haben gezeigt, dass die Anzahl der Partikel vom Betriebszustand abhängig ist und stark variieren kann. Dies macht noch genauere Untersuchungen erforderlich, um eine zuverlässige Messprozedur zu entwickeln.

Des Weiteren sind bei der Messung von Benzinfahrzeugen aufgrund der chemischen Abgaszusammensetzung höhere Feuchtigkeitswerte zu erwarten, und die emittierten Rußpartikel sind im Mittel etwas kleiner als die von Dieselfahrzeugen.

### *Warum ist es in der der PTI schwieriger, Sub-23 nm Partikel zu messen?*

In der Typenzulassung kommen nach dem Particle Measurement Programme (PMP) komplexe und teure Systeme mit mehreren Verdünnungsstufen und Catalytic Stripper zum Einsatz. Damit wird einerseits ein geringer Verlust im Sub-23-nm-Bereich erreicht und andererseits eine Entfernung der volatilen Komponenten erzielt. Derartige Systeme können aufgrund der Anforderungen in der PTI, der praktischen Verwendung in Werkstätten und wesentlich geringeren Kostenanforderungen, nicht verwendet werden. Die hohen Verluste im Sub-23-nm-Bereich führen zu einer großen Messunsicherheit und beeinträchtigen somit die Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit erheblich. Des Weiteren können in PTI-Messgeräten vermehrt Artefakte wie homogene Nukleation auftreten, die zu einer erhöhten Anzahl von Falscherkennungen führen könnten.

### *Wie soll aus AVL DiTEST Sicht die Benzinermessung aussehen?*

Der Schwerpunkt muss auf die Entwicklung einer zuverlässigen Messprozedur gelegt werden, um Fahrzeuge mit hohen Emissionen bzw. defekte Ottopartikelfilter zuverlässig und praktikabel festzustellen. Des Weiteren ist es wichtig, die Geräte zur Benzinermessung in Bezug auf Messgenauigkeit und den Einfluss von Feuchtigkeit sowie volatilen Komponenten zu verifizieren, um wie bei der Dieselmessung zuverlässige Messgeräte für die Überprüfung zu gewährleisten.

## Literatur

- [1] WHO (2021), WHO global air quality guidelines. World Health Organization.  
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf> (Last accessed on 2025/04/15)
- [2] Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, 113, 823–839.  
<https://doi.org/10.1289/ehp.7339>
- [3] Bainschab et al. (2020), Particle Number Measurements within Periodic Technical Inspections: A First Quantitative Assessment of the Influence of Size Distributions and the Fleet Emission Reduction. *Atmospheric Environment: X*,  
<https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2020.100095>
- [4] Boveroux, F. et al (2019). Feasibility study of a new test procedure to identify high emitters of particulate matter during periodic technical inspection. *SAE Technical Papers 2–9*. <https://doi.org/10.4271/2019-01-1190>
- [5] Bartscher, H., Lutz, T., Mayer, A. (2019). A new periodic technical inspection for particle emissions of vehicles. *Emission Control Science and Technology*.  
<https://doi.org/10.1007/s40825-019-00128-z> .
- [6] Gloor, B., (2018). Survey about functional efficiency of DPF during PTI in Zürich. *ETH Conference Zürich*, [http://www.nanoparticles.ch/archive/2018\\_Gloor\\_FO.pdf](http://www.nanoparticles.ch/archive/2018_Gloor_FO.pdf)
- [7] TÜV Verband (2025), Feinstaub-Messung bei der Abgasuntersuchung im zweiten Jahr – Abgasdiagnose braucht mehr als OBD: Endrohrmessung deckt zwei Drittel der Defekte erst auf, [https://www.tuev-verband.de/fileadmin/user\\_upload/Content\\_local/2025\\_Stellungnahme\\_Partikelmessung\\_Abgasuntersuchung.pdf](https://www.tuev-verband.de/fileadmin/user_upload/Content_local/2025_Stellungnahme_Partikelmessung_Abgasuntersuchung.pdf)
- [8] Hahn H. (2025), Availability of PN-Instruments allows an immediate start worldwide. 15th VERT Forum 2025, Dübendorf (CH), <http://vert-certification.eu/j3/index.php?view=article&id=73:14th-vert-forum-2024-march-22nd-2024-empa-duebendorf-switzerland&catid=8>
- [9] Buekenhoudt P. (2025), The DirtyTailParadigm: PN-PTI successfully on the road and requires little effort, 15th VERT Forum 2025, Dübendorf (CH), <http://vert-certification.eu/j3/index.php?view=article&id=73:14th-vert-forum-2024-march-22nd-2024-empa-duebendorf-switzerland&catid=8>
- [10] Knoll M., (2025), PN-PTI emissions of a Swiss petrol passenger car fleet of 1000 vehicles, 15th VERT Forum 2025, Dübendorf (CH), <http://vert-certification.eu/j3/index.php?view=article&id=73:14th-vert-forum-2024-march-22nd-2024-empa-duebendorf-switzerland&catid=8>
- [11] Vouitsis et al. (2017), Particulate mass and number emission factors for road vehicles based on literature data and relevant gap filling methods, *Atmospheric Environment*,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.010>

- [12] Xue et al. (2015), Comparison of Vehicle Exhaust Particle Size Distributions Measured by SMPS and EEPS During Steady-State Conditions, *Aerosol Science and Technology*, <https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1088146>
- [13] Luo et al. (2015), Size distribution, chemical composition and oxidation reactivity of particulate matter from gasoline direct injection (GDI) engine fueled with ethanol-gasoline fuel, *Applied Thermal Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.060>
- [14] Bertscher H. & Mayer A., (2025), How to reduce fleet emissions - focus on high emitters, <http://vert-certification.eu/j3/index.php?view=article&id=73:14th-vert-forum-2024-march-22nd-2024-empa-duebendorf-switzerland&catid=8>
- [15] Melas et al. (2021), Evaluation of Solid Particle Number Sensors for Periodic Technical Inspection of Passenger Cars, *MDPI Sensors*, <https://doi.org/10.3390/s21248325>
- [16] Melas et al. (2025), Particle number measurement in the periodic technical inspection (PN-TI) of gasoline vehicles, *European Aerosol Conference 2025, Lecce*
- [17] Giechaskiel et al. (2019), Exhaust Gas Condensation during Engine Cold Start and Application of the Dry-Wet Correction Factor. *MDPI Applied Sciences*, <https://doi.org/10.3390/app9112263>
- [18] Joshi, A. & Johnson, T.V. (2018) Gasoline Particulate Filters—a Review. *Emiss. Control Sci. Technol.*, <https://doi.org/10.1007/s40825-018-0101-y>
- [19] Platt et al. (2017), Gasoline cars produce more carbonaceous particulate matter than modern filter-equipped diesel cars. *Nature Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03714-9>
- [20] Kontses et al. (2020), Particle number (PN) emissions from gasoline, diesel, LPG, CNG and hybrid-electric light-duty vehicles under real-world driving conditions. *Atmospheric Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117126>