WHITEPAPER

DIE ZUKUNFT DER PARTIKELANZAHLMESSUNG

PRÄZISE, WARTUNGSARM UND EURO 7-READY

MAHA

WHITEPAPER

Die Zukunft der Partikelanzahlmessung
Präzise, wartungsarm und Euro 7-ready

Version 1.02
Datum 10. März 2026
Autor Dr. Peter Geigle

MAHA SE & Co. KG
Hoyen 20
87490 Haldenwang | Germany

KAPITEL

1 Einleitung 6

2 Grundlagen der Partikelzählung 7

2.1 Definition und Eigenschaften von Abgaspartikeln 7
2.2 Physikalische Grundlagen der Partikelmessung 7
2.3 Einflussfaktoren auf die Partikelemissionen 8
2.4 Bedeutung der Partikelzählung im Vergleich zur Partikelmassenmessung 8
2.5 Forschungsergebnisse zur Partikelemission und -messung 9
2.6 Relevante regulatorische Normen für die Partikelzählung 9

3 Messmethoden zur Partikelzählung 10

3.1 Direkte Partikelzählverfahren 10
3.1.1 Kondensationspartikelzähler 10
3.1.2 Diffusionsaufladung 11
3.1.3 Optische Partikelzähler (Laser-basierte PN-Sensoren) 11
3.2 Indirekte Verfahren zur Partikelzählung 11
3.2.1 Gravimetrische Filtermessung (PM-Methode) 12
3.2.2 Laser-Extinktionsmessung (Opazitätstests in der PTI) 12
3.3 Vergleich der Messmethoden 12

4 Regulatorische Anforderungen 13

4.1 Internationale und europäische Regulierungen 13
4.1.1 Particle Measurement Programme (PMP) – UNECE GRPE 13
4.1.2 Euro 5b, 6b und kommende Euro 7 Norm 13
4.2 Nationale Vorschriften zur Partikelzählung in der PTI 14
4.2.1 Deutschland 14
4.2.2 Belgien 14
4.2.3 Niederlande 14
4.2.4 Schweiz 14
4.3 Relevante ISO- und DIN-Normen 15

4.3.1 ISO 27891:2015 – Kalibrierung von CPCs . . . 15
4.3.2 UNECE R83 – Typgenehmigung von Fahrzeugen . . . 15

5 Herausforderungen . . . 16

5.1 Einflussfaktoren auf die Messergebnisse . . . 16
5.1.1 Temperatur- und Druckabhängigkeit . . . 16
5.1.2 Verdünnung und Probenaufbereitung . . . 16
5.1.3 Einfluss der Partikelgröße und -morphologie . . . 16
5.2 Herausforderungen bei der mobilen Partikelzählung (RDE & PEMS) . . . 17
5.2.1 Echtzeitmessungen unter realen Fahrbedingungen . . . 17
5.2.2 Sensoralterung und Wartung . . . 17
5.3 Vergleich von Labor- und Feldmessungen . . . 18
5.3.1 Unterschiedliche Ergebnisse zwischen Prüfstand und Praxis . . . 18
5.3.2 Kalibrierung und Referenzinstrumente . . . 18

6 Innovative Lösung: MET PC7.0 . . . 19

6.1 Technologischer Aufbau des MET PC7.0 . . . 19
6.2 Vorteile des MET PC7.0 gegenüber bestehenden Systemen . . . 22
6.3 Anwendungsbereiche des MET PC7.0 . . . 22
6.4 Vergleichsmessungen und Validierung . . . 23
6.5 Varianten des MET PC7.0: Basic und Comfort . . . 23

7 Fazit und Ausblick . . . 24

7.1 Die wichtigsten Vorteile der MET PC7.0-Geräte . . . 24
7.2 Zukunft der Partikelzählung mit MET PC7.0 . . . 25

Disclaimer

Dieses White Paper wurde auf Basis fundierter wissenschaftlicher Erkenntnisse, regulatorischer Vorgaben und praktischer Erfahrungen in der Abgasmesstechnik erstellt. **MAHA** verfügt über langjährige **internationale Erfahrung** in der Entwicklung und Implementierung von **Prüftechnologien für die Periodische Technische Inspektion (PTI)** und ist in vielen Ländern weltweit als führender Anbieter von Prüfständen und Abgasmesssystemen etabliert.

Die Inhalte dieses Dokuments spiegeln die **aktuellen Entwicklungen in der Partikelanzahlmessung (PN)** wider und bieten einen umfassenden Überblick über **Messmethoden, gesetzliche Anforderungen und technologische Herausforderungen**. Die Erfahrung aus **tausenden von Prüfanlagen weltweit**, sowohl in der PTI als auch in der **Fahrzeugentwicklung und Emissionsüberwachung**, bildet eine wesentliche Grundlage für die hier dargestellten Analysen.

MAHA ist seit Jahrzehnten ein verlässlicher Partner für Behörden, Prüforganisationen, Forschungseinrichtungen und Werkstätten. Die Abgasanalysetechnologien des Unternehmens erfüllen die höchsten gesetzlichen Anforderungen und sind an führenden Prüflaboren und PTI-Stationen im Einsatz. Mit dieser langjährigen Expertise trägt MAHA aktiv zur Weiterentwicklung der **gesetzlich vorgeschriebenen Abgasprüfverfahren** und zur Einhaltung zukünftiger **Euro-7-Standards** bei.

Alle in diesem Dokument enthaltenen **technologischen Vergleiche, regulatorischen Analysen und Zukunftsprognosen** basieren auf aktuellen Marktentwicklungen und öffentlich zugänglichen Daten. Die in diesem White Paper beschriebenen Verfahren und Innovationen stehen nicht exklusiv mit einem bestimmten Produkt oder System in Verbindung, sondern sollen einen **objektiven Überblick über die Zukunft der Partikelanzahlmessung und deren Bedeutung für die Emissionskontrolle** bieten.

1 EINLEITUNG

Die Messung von Partikelemissionen im Abgas von Verbrennungsmotoren spielt eine entscheidende Rolle für den Umweltschutz, die öffentliche Gesundheit und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften. Während die gravimetrische Partikelmassenmessung (PM) über viele Jahre hinweg als Standardmethode galt, hat sich die Partikelanzahlmessung (Particle Number, PN) in den letzten Jahren als präzisere Alternative etabliert. Diese Entwicklung ist darauf zurückzuführen, dass ultrafeine Partikel (UFP, <100 nm) einen erheblichen Einfluss auf die menschliche Gesundheit haben, jedoch aufgrund ihrer geringen Masse mit herkömmlichen PM-Messmethoden nicht zuverlässig erfasst werden können [2].

Internationale Regulierungsbehörden haben darauf reagiert und mit der Einführung des **Particle Measurement Programme (PMP)** unter der Schirmherrschaft der **United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)** eine standardisierte Methodik zur PN-Messung etabliert [3] [4]. Diese Methodik ist mittlerweile fester Bestandteil gesetzlicher Abgasnormen in Europa, wodurch Länder wie Deutschland, Belgien und die Niederlande **Partikelzählmessungen in die Periodische Technische Inspektion (PTI)** aufgenommen haben [5]. Ziel dieser Maßnahmen ist es, sicherzustellen, dass Dieselpartikelfilter (DPF) und andere Abgasnachbehandlungssysteme in Fahrzeugen ordnungsgemäß funktionieren und keine unerwartet hohen Emissionen auftreten.

Die Entwicklung präziser und stabiler Partikelzählmethoden stellt eine wesentliche Herausforderung dar, da zahlreiche Faktoren wie **Partikelgröße, chemische Zusammensetzung und Morphologie** die Erfassungsrate beeinflussen können. In den letzten Jahren wurden verschiedene Messverfahren entwickelt, darunter **Kondensationspartikelzähler (CPC), Diffusionsaufladungssensoren (DC)** sowie **elektrometerbasierte Verfahren**. Diese Methoden unterscheiden sich hinsichtlich Empfindlichkeit, Wartungsaufwand und Eignung für verschiedene Anwendungen wie PTI-Prüfungen, mobile Emissionsmessungen oder Prüfstandtests.

Dieses White Paper gibt einen detaillierten Überblick über die wissenschaftlichen Grundlagen der Partikelzählung und analysiert gängige Messmethoden sowie deren Herausforderungen. Zudem werden regulatorische Entwicklungen dargestellt, die für die zukünftige Emissionsüberwachung von Bedeutung sind. Abschließend wird der von **MAHA** entwickelte Partikelzähler **PC7.0** vorgestellt – eine innovative und praxistaugliche Alternative zu bestehenden Systemen, die sich insbesondere durch ihre Robustheit, Wartungsfreundlichkeit und hohe Präzision auszeichnet.

2 GRUNDLAGEN DER PARTIKELZÄHLUNG IM ABGAS

2.1 DEFINITION UND EIGENSCHAFTEN VON ABGASPARTIKELN

Abgaspartikel entstehen während der Verbrennung von Kraftstoffen in Motoren und bestehen aus einer Vielzahl von festen und flüchtigen Bestandteilen. Sie lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen [2]:

- **Nukleationsmodus (d < 50 nm):** Diese ultrafeinen Partikel entstehen durch die Kondensation flüchtiger Substanzen und besitzen oft keine feste Kohlenstoffstruktur. Aufgrund ihrer geringen Masse sind sie besonders anfällig für Verdünnungs- und Abkühlungsprozesse und können sich leicht in der Umgebungsluft verteilen.

- **Akkumulationsmodus (d ≈ 50–200 nm):** Diese Partikel bestehen hauptsächlich aus Rußagglomeraten, die während der Verbrennung entstehen und häufig mit organischen oder metallischen Substanzen beschichtet sind. Sie sind langlebiger als Nukleationspartikel und tragen erheblich zur Feinstaubbelastung bei [4].

- **Grobpartikel (d > 200 nm):** Diese größeren Partikel entstehen vorwiegend durch mechanischen Abrieb, etwa durch Bremsen- und Reifenverschleiß, oder durch Ablagerungen in der Abgasanlage, die sich durch Strömungsmechanismen wieder lösen können [5].

Die Erfassung dieser Partikel ist entscheidend, da insbesondere ultrafeine Partikel des Nukleations- und Akkumulationsmodus tief in die Lunge eindringen und mit einer Vielzahl von Gesundheitsrisiken, darunter Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, in Verbindung gebracht werden.

2.2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN DER PARTIKELMESSUNG

Die Partikelanzahlmessung basiert auf verschiedenen physikalischen Prinzipien, die zur Bestimmung der Partikelkonzentration und -eigenschaften genutzt werden:

- **Elektrostatische Aufladung:** Einige Messverfahren nutzen die Diffusionsaufladung, bei der Partikel durch Ionenladung markiert und anschließend durch elektrische Felder detektiert werden.

- **Kondensationsvergrößerung:** Bei der Kondensationspartikelzählung (CPC) werden ultrafeine Partikel durch eine kondensierbare Flüssigkeit (z. B. Butanol) vergrößert, sodass sie optisch erfasst werden können.

- **Ladungsdetektion:** Elektrometerbasierte Sensoren messen die durch geladene Partikel transportierte elektrische Ladung und berechnen daraus die Partikelkonzentration.

- **Optische Streuung:** Laserbasierte Sensoren detektieren Partikel anhand der Lichtstreuung an ihrer Oberfläche, wobei kleinere Partikel oft weniger effizient erfasst werden [7].

2.3 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE PARTIKELEMISSIONEN

Die Menge und Zusammensetzung der emittierten Partikel wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst [8]:

- **Brennstofftyp:** Dieselmotoren emittieren in der Regel mehr Rußpartikel als Benzinmotoren, während alternative Kraftstoffe wie Erdgas oder Wasserstoff oft geringere Partikelemissionen verursachen.

- **Verbrennungstechnologie:** Direkteinspritzende Benzinmotoren (GDI) erzeugen häufig höhere Partikelzahlen als Saugrohreinspritzmotoren, da der Kraftstoff nicht ausreichend vorgemischt wird und sich Tröpfchen im Brennraum bilden können [10].

- **Abgasnachbehandlung:** Systeme wie Dieselpartikelfilter (DPF) oder Ottopartikelfilter (OPF) reduzieren die Partikelanzahl erheblich. Allerdings können Fehlfunktionen oder Manipulationen dazu führen, dass die Filter ihre Wirkung verlieren und unbemerkt hohe Emissionen auftreten [4].

- **Fahrbedingungen:** Kalte Motorstarts, hohe Lastzustände oder plötzliche Lastwechsel beeinflussen die Partikelbildung und können zu erhöhten Emissionen führen [11].

2.4 BEDEUTUNG DER PARTIKELZÄHLUNG IM VERGLEICH ZUR PARTIKELMASSENMESSUNG

Die herkömmliche Messung der Partikelmasse (PM) ist weiterhin von regulatorischer Bedeutung, weist jedoch mehrere Einschränkungen auf [9]:

- **Keine Differenzierung nach Partikelgröße:** PM-Messungen können nicht zwischen gesundheitsschädlichen ultrafeinen Partikeln und größeren Partikeln unterscheiden.

- **Begrenzte Empfindlichkeit:** Die Nachweisgrenze gravimetrischer Messungen liegt bei wenigen µg/m³, was für moderne Abgassysteme oft nicht ausreichend ist.

- **Lange Messdauer:** PM-Filter müssen nach jeder Messung gewogen werden, was die zeitliche Auflösung einschränkt.

Demgegenüber bietet die Partikelanzahlmessung (PN) mehrere Vorteile [5]:

- **Bessere Erfassung ultrafeiner Partikel:** PN-Messungen konzentrieren sich auf Größenbereiche, die für die Gesundheitsbewertung besonders relevant sind.

- **Höhere zeitliche Auflösung:** PN-Sensoren liefern kontinuierliche Messwerte, wodurch eine genauere Beurteilung der Emissionen möglich ist.

- **Eindeutige Korrelation mit modernen Emissionsnormen:** PN-Grenzwerte sind bereits Bestandteil europäischer Fahrzeugprüfungen und Periodischer Technischer Inspektionen (PTI).

2.5 FORSCHUNGSERGEBNISSE ZUR PARTIKELEMISSION UND -MESSUNG

Wissenschaftliche Studien belegen, dass die Partikelanzahlmessung eine genauere Bewertung der Gesundheits- und Umweltbelastung durch Fahrzeugemissionen ermöglicht. Wichtige Erkenntnisse umfassen:

- **Publikation zu Feldstudie in China (2025):** Untersucht wurde die Partikelemissionsverteilung und die Systematik der „High-Emitter" nachgewiesen. Der Handlungsbedarf bei der Verschärfung der Emissionsgesetzgebung wird dargelegt [12].

- **Laborstudie über EURO 5 und EURO 6 Fahrzeuge (2022):** Es wurde festgestellt, dass bei den untersuchten 56 Fahrzeugen die Partikelemissionen von Benzinmotoren mit Saugrohreinspritzung am höchsten waren. Der Einfluss der Außentemperatur ist ebenso sehr hoch, geringe Temperaturen erhöhen die PN-Emissionen stark [13].

- **Artikel zu Feldstudie über den Einfluss von Fahrsituationen bei Ottomotoren in China (2022):** Kaltstart- und niedrige Geschwindigkeitsszenarien wurden als besonders kritisch identifiziert bzgl. PN-Emissionen, ebenso zeigten Fahrzeuge mit Direkteinspritzung deutlich höhere Emissionen als welche mit Mehrpunkteinspritzung [14].

- **Studie von Karjalainen et al. (2021):** Diese Untersuchung zeigt, dass kraftstoffbetriebene Zusatzheizungen (AH – Auxiliary Heaters) eine signifikante Partikelquelle darstellen, die in aktuellen Regulierungen oft nicht berücksichtigt wird [1].

2.6 RELEVANTE REGULATORISCHE NORMEN FÜR DIE PARTIKELZÄHLUNG

Die Einführung von Partikelanzahlmessungen in Abgasnormen hat sich in den letzten Jahren stark beschleunigt. Wichtige Vorschriften umfassen:

- **PMP-Protokoll (UNECE GRPE):**
  - Entwickelt zur Ergänzung der gravimetrischen PM-Messung mit einer standardisierten PN-Methode.
  - Definiert eine Cut-Off-Grenze von **23 nm** zur Erfassung fester Partikel.
  - PMP-konforme CPCs werden als Referenzmethode eingesetzt [5].

- **Periodische Technische Inspektion (PTI) – Deutschland, Schweiz, Belgien, Niederlande:**
  - Einführung von Grenzwerten von **250.000 #/cm³**, bzw. **1.000.000 #/cm³**

Deutschland	Euro 6, Euro VI
Schweiz	Alle Dieselfahrzeuge mit DPF
Belgien	Euro 5 b, Euro 6
Niederlande	Alle Dieselfahrzeuge mit DPF: Euro 3, 4, 5, 6 and Euro VI

  - Ziel: Identifikation defekter oder manipulierter Dieselpartikelfilter (DPF).
  - Prüfgeräte müssen normenkonform kalibriert werden.

- **Euro 6b und zukünftige Abgasnormen**:
  - Einführung von PN-Grenzwerten für Ottomotoren mit Direkteinspritzung (GDI).
  - Erweiterung auf **nicht-auspuffbedingte Emissionen** (Brems- und Reifenabriebpartikel) in Euro 7 [15].

- **ISO 27891:2015 – Kalibrierung von Kondensationspartikelzählern (CPCs):**
  - Definiert Standards für CPC-basierte Partikelzählung.
  - Wichtige Grundlage für PTI- und Typprüfungsverfahren.

Diese Normen unterstreichen die wachsende Bedeutung der Partikelzählung als zentrale Methode zur Emissionskontrolle.

3 MESSMETHODEN ZUR PARTIKELZÄHLUNG

Die Erfassung der Partikelanzahl im Abgas erfolgt durch verschiedene Messtechnologien, die sich in Bezug auf **Genauigkeit, Empfindlichkeit, Messaufwand und Anwendungsbereiche** unterscheiden. Grundsätzlich lassen sich diese Methoden in **direkte** und **indirekte Verfahren** unterteilen [2].

3.1 DIREKTE PARTIKELZÄHLVERFAHREN

Direkte Verfahren messen die Partikelanzahl unmittelbar und liefern hochauflösende Echtzeitdaten. Sie sind besonders geeignet für **Typprüfungen, PTI-Messungen und mobile Messsysteme (PEMS)** [3].

3.1.1 KONDENSATIONSPARTIKELZÄHLER (CPC – CONDENSATION PARTICLE COUNTER)

- **Messprinzip:** CPCs nutzen eine kondensierbare Flüssigkeit (z. B. Butanol oder Isopropanol), um kleinste Partikel durch Kondensation zu vergrößern, sodass sie optisch detektiert werden können [4].

- **Vorteile:**
  - Hohe Sensitivität für Partikel im Bereich von **~7 nm bis >1 µm**.
  - **PMP-Standardmethode** für PN-Messungen [5].
  - Referenzgerät für viele gesetzliche Prüfverfahren.

- **Nachteile:**
  - Regelmäßiges **Nachfüllen des Betriebsmediums erforderlich** (Wartungsaufwand).
  - **Temperaturempfindlich**, anfällig für Verdunstungsverluste.
  - **Reaktionszeit ca. 1 Sekunde**, begrenzte Eignung für transiente Prozesse.

3.1.2 DIFFUSIONSAUFLADUNG (DC – DIFFUSION CHARGER TECHNOLOGIE)

- **Messprinzip:** Partikel werden durch **Ionenladung markiert** und abgeschieden. Die dabei entstehende Ladung wird gemessen und in eine Partikelanzahl umgerechnet [2].

- **Vorteile:**
  - **Robuste und kompakte Bauweise**, keine Flüssigkeit erforderlich.
  - **Sehr kurze Aufwärm- und Reaktionszeiten** (Millisekundenbereich).
  - Messbereich auf Anforderungen für PTI-Endrohrmessung abgestimmt, **hohe Messgenauigkeit** in relevantem Messbereich

- **Nachteile:**
  - Abhängigkeit von Partikelladung, exakte Kalibrierung wichtig.
  - **Geringere Sensitivität für sehr kleine Partikel (<20 nm)**.

3.1.3 OPTISCHE PARTIKELZÄHLER (LASER-BASIERTE PN-SENSOREN)

- **Messprinzip:** Licht wird von Partikeln gestreut, und die Intensitätsveränderung des gestreuten Lichts wird zur Bestimmung der Partikelanzahl genutzt [7].

- **Vorteile:**
  - **Echtzeitmessung mit hoher zeitlicher Auflösung**.
  - **Kompakte Bauweise**, ideal für mobile Anwendungen.

- **Nachteile:**
  - **Geringere Genauigkeit für kleine Partikel (<50 nm)**.
  - Abhängig von Partikelzusammensetzung und -form.

3.2 INDIREKTE VERFAHREN ZUR PARTIKELZÄHLUNG

Indirekte Verfahren messen Partikel nicht direkt, sondern berechnen die Anzahl anhand anderer physikalischer Eigenschaften [8].

3.2.1 GRAVIMETRISCHE FILTERMESSUNG (PM-METHODE)

- **Messprinzip:** Partikel werden auf einem Filter gesammelt und gewogen.

- **Nachteile für PN-Messungen**:
  - **Keine Differenzierung nach Partikelgröße**.
  - **Hohe Nachweisgrenzen**, daher ungeeignet für PN-Regulierungen.

3.2.2 LASER-EXTINKTIONSMESSUNG (OPAZITÄTSTESTS IN DER PTI)

- **Messprinzip:** Die Lichtabschwächung durch Rußpartikel wird gemessen.

- **Nachteile:**
  - **Unempfindlich für ultrafeine Partikel**.
  - **Hohe Schwankungen je nach Motortyp und Kraftstoff**.

3.3 VERGLEICH DER MESSMETHODEN

METHODE	MESSPRINZIP	VORTEILE	NACHTEILE
CPC (PMP-Referenz-methode)	Kondensation von Partikeln zur optischen Detektion	Sehr hohe Sensitivität, standardisiert	Flüssigkeitsnachfüllung nötig, langsam
Diffusionsaufladung (DC)	Partikel werden gela-den, Ladungsfluss wird gemessen	Wartungsfrei, schnelle Reaktionszeit	Abhängig von Partikel-ladung
Elektrometer (FCE)	Messung der Gesamtla-dung geladener Partikel	Hohe Sensitivität, lang-lebig	Keine Größeninformation, druckabhängig
Optische Zählung (Laser-PN)	Lichtstreuung durch Partikel	Kompakt, Echtzeitmes-sung	Unempfindlich für kleine Partikel
Gravimetrische Filtermessung	Filter sammelt Partikel, Gewicht wird bestimmt	Standardverfahren für PM	Ungeeignet für PN, lange Messdauer
Laser-Extinktions-messung	Lichtabsorption durch Rußpartikel	Schnell, robust	Keine UFP-Erfassung, hohe Messunsicherheit

Diese Analyse zeigt, dass **CPCs als etablierte Referenzgeräte** weiterhin die höchste Genauigkeit bieten, jedoch wartungsintensiv sind. **Diffusionsaufladungssensoren** (DC) bieten eine vielversprechende Alternative mit geringem Wartungsaufwand und schneller Reaktionszeit. **Elektrometer und optische PN-Sensoren** stellen komplementäre Technologien dar, die je nach Anwendung Vor- und Nachteile aufweisen.

Mit der zunehmenden Bedeutung der Partikelanzahlmessung in **gesetzlichen Prüfverfahren (z. B. PTI, RDE, Euro 7)** wird die Wahl des geeigneten Messprinzips in Zukunft eine noch größere Rolle spielen.

4 REGULATORISCHE ANFORDERUNGEN UND NORMEN ZUR PARTIKELZÄHLUNG

Die zunehmende Bedeutung der Partikelanzahlmessung (PN) als Ergänzung zur traditionellen Partikelmassenmessung (PM) hat zu einer Vielzahl neuer **gesetzlicher Vorschriften und technischer Normen** geführt. Diese betreffen nicht nur die **Typprüfung neuer Fahrzeuge**, sondern auch **Periodische Technische Inspektionen (PTI)** zur Kontrolle von Emissionen im Fahrbetrieb [1][2].

4.1 INTERNATIONALE UND EUROPÄISCHE REGULIERUNGEN

4.1.1 PARTICLE MEASUREMENT PROGRAMME (PMP) – UNECE GRPE

Das **Particle Measurement Programme (PMP)** wurde von der **United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)** entwickelt, um standardisierte Verfahren zur Partikelzählung zu etablieren. Das wichtigste Ergebnis dieser Initiative war die Einführung der **PN-Messung als offizielle Prüfmethode** für Euro 5 und Euro 6 Fahrzeuge [3].

- **Schlüsselkriterien des PMP-Protokolls:**
  - **Cut-Off-Größe von 23 nm:** Erfassung fester Partikel, während flüchtige Partikel durch Verdampfung entfernt werden.
  - **Kondensationspartikelzähler (CPC) als Referenzmethode**: Sicherstellung hoher Sensitivität und Reproduzierbarkeit.
  - **Prüfung unter standardisierten Bedingungen:** Klare Vorgaben für Probenahme, Verdünnung und Temperierung der Abgasprobe [4].

Diese Vorgaben sind die **Grundlage für gesetzliche PN-Grenzwerte** in der Europäischen Union sowie in weiteren internationalen Märkten, in denen Abgasnormen zunehmend verschärft werden [5].

4.1.2 EURO 5B, 6B UND KOMMENDE EURO 7 NORM

Euro 5b:

- Einführung von **PN-Grenzwerten für Dieselmotoren**.

Euro 6b:

- Einführung von **PN-Grenzwerten für Ottomotoren mit Direkteinspritzung (GDI)**.
- **Partikelgrenzwert für Diesel- und Benzinmotoren:** 6×10^{11} Partikel/km.

Euro 7 (geplant ab 2027) [16]:

- Erweiterung der **PN-Grenzwerte auf Nicht-Abgas-Emissionen** (z. B. **Reifen- und Bremsabriebpartikel**).

- **Senkung der PN-Grenzwerte für GDI-Motoren**, um ultrafeine Partikelemissionen noch strikter zu regulieren.
- **Echtzeitüberwachung von PN-Emissionen mit PEMS (Portable Emission Measurement Systems)**, um Messungen unter realen Fahrbedingungen sicherzustellen.

Die geplanten Euro-7-Vorgaben werden die Anforderungen an Partikelmessgeräte weiter verschärfen und insbesondere die Bedeutung mobiler PN-Messsysteme für **Real-Driving Emissions (RDE)** und PTI-Tests erhöhen.

4.2 NATIONALE VORSCHRIFTEN ZUR PARTIKELZÄHLUNG IN DER PTI

Einige Länder haben bereits **PN-Messungen in die Periodische Technische Inspektion (PTI)** aufgenommen, um manipulierte oder defekte Dieselpartikelfilter (DPF) aufzudecken [7].

4.2.1 DEUTSCHLAND

- Seit **Januar 2023** Pflicht für **Euro 6 Diesel-Pkw und -Transporter**.
- **Grenzwert:** 250.000 Partikel/cm³.
- **Prüfgeräte:** Müssen kalibriert sein und eine **Messunsicherheit von <25 %** aufweisen.

4.2.2 BELGIEN

- Einführung der **PN-Messung in der PTI ab 01. Juli 2022**.
- **Grenzwert:** 1.000.000 Partikel/cm³.

4.2.3 NIEDERLANDE

- Einführung der **PN-Messung ab Januar 2023.**
- **Grenzwert:** 1.000.000 Partikel/cm³.

4.2.4 SCHWEIZ

- **Schweiz:** Einführung der **PN-PTI für Diesel ab 2024**.
- **Grenzwert:** 250.000 Partikel/cm³.

4.3 RELEVANTE ISO- UND DIN-NORMEN FÜR PARTIKELZÄHLGERÄTE

Neben den gesetzlichen Vorschriften gibt es eine Reihe von technischen **Normen und Kalibrierstandards**, die die Qualität und Genauigkeit von PN-Messgeräten sicherstellen.

4.3.1 ISO 27891:2015 – KALIBRIERUNG VON CPCs

- Standard für die **Kalibrierung von Kondensationspartikelzählern (CPCs)**.
- Definiert Anforderungen an **Messgenauigkeit, Stabilität und Reproduzierbarkeit**.
- Grundlage für die **Zertifizierung von PTI-Prüfgeräten** in Deutschland und anderen europäischen Ländern.

4.3.2 UNECE R83 – TYPGENEHMIGUNG VON FAHRZEUGEN

- Enthält **Anforderungen für PN-Messungen bei der Homologation neuer Fahrzeuge**.
- Grundlage für die **gesetzlichen Emissionsprüfungen nach Euro 6d und Euro 7** [5].

Zusammenfassung und Ausblick

Die regulatorischen Anforderungen an die **Partikelanzahlmessung (PN)** haben sich in den letzten Jahren erheblich verschärft. **Die Relevanz der PN-Messung** innerhalb der Typprüfung **nimmt stetig zu, ebenso wächst weltweit das Interesse die PN-Messung in die PTI-Prüfung aufzunehmen**, um Manipulationen und Fehlfunktionen an Abgasnachbehandlungssystemen zu verhindern.

- **PN-Messungen sind mittlerweile fester Bestandteil der PTI in Deutschland, den Niederlanden, Schweiz und Belgien.**
- **Euro 7 wird erstmals auch nicht-auspuffbedingte Partikelemissionen (z. B. Reifen- und Bremsabrieb) regulieren.**
- **Technische Normen wie ISO 27891 sorgen für standardisierte und zuverlässige Messverfahren.**

Die kontinuierliche Weiterentwicklung gesetzlicher Vorschriften wird dazu führen, dass neue **Messsysteme mit hoher Präzision, Langzeitstabilität und geringem Wartungsaufwand** erforderlich sind, um die neuen Anforderungen zu erfüllen [9].

5 HERAUSFORDERUNGEN BEI DER PARTIKELZÄHLUNG

Die Partikelanzahlmessung stellt hohe Anforderungen an **Messtechnik, Umweltbedingungen und Kalibrierung**. Obwohl moderne Systeme eine hohe Genauigkeit aufweisen, gibt es zahlreiche **externe Faktoren**, die das Messergebnis beeinflussen können. Dieses Kapitel beleuchtet die wichtigsten **Herausforderungen** und deren Auswirkungen auf die Messqualität [2].

5.1 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE MESSERGEBNISSE

5.1.1 TEMPERATUR- UND DRUCKABHÄNGIGKEIT

- Partikelkonzentrationen können **stark variieren**, je nach **Druck- und Temperaturbedingungen** während der Messung [3].

- Höhenlage und Wetterbedingungen **(Luftdruckschwankungen, Temperaturveränderungen)** beeinflussen insbesondere **elektrostatische Sensoren** wie Diffusionsaufladungssensoren (DC) [4].

- **Lösung:**
  - Moderne Systeme setzen auf **druckkompensierte Sensoren** oder **adaptive Algorithmen**, um Umweltveränderungen auszugleichen [5].
  - **Temperaturstabilisierte Probenahmesysteme** verhindern Verdampfungsverluste.

5.1.2 VERDÜNNUNG UND PROBENAUFBEREITUNG

- In vielen Messverfahren muss das Abgas **verdünnt** werden, um die Sensoren vor Überlastung zu schützen.

- **Herausforderung**: Eine **ungleichmäßige Verdünnung** kann zu Fehlmessungen führen, indem Partikel selektiv entfernt oder verändert werden.

- **Lösung:**
  - Verwendung von **thermischen Verdünnungssystemen**, um **Nukleationspartikel zu eliminieren** und die Probe für **CPC-basierte Messungen stabil** zu halten.
  - **Homogenisierung der Probe** zur Vermeidung von Partikelverlusten.

5.1.3 EINFLUSS DER PARTIKELGRÖSSE UND -MORPHOLOGIE

- **Problem:** Unterschiedliche Partikelformen (**kugelförmig, agglomeriert, fraktal**) beeinflussen die **Ladungsaufnahme** und damit die **Effizienz elektrostatischer Messverfahren** [6].

- **Praxisbeispiel:**
  - **Rußpartikel aus Dieselaggregaten** haben andere elektrische Eigenschaften als **kondensierte Ölpartikel aus Benzinmotoren** [17].

- **Lösung:**
  - **Normierte Kalibrierverfahren mit NaCl- oder DEHS-Partikeln** gemäß **ISO 27891**.
  - **Vergleichsmessungen mit Referenzinstrumenten**, um systematische Fehler zu minimieren.

5.2 HERAUSFORDERUNGEN BEI DER MOBILEN PARTIKELZÄHLUNG (RDE & PEMS)

5.2.1 ECHTZEITMESSUNGEN UNTER REALEN FAHRBEDINGUNGEN

- Die Messung von Partikelzahlen in **realen Fahrzyklen (RDE – Real Driving Emissions)** erfordert **mobile und robuste Messgeräte** [8].

- **Problem:**
  - **Transiente Lastwechsel** und **kurze Spitzenwerte** erfordern eine **hohe zeitliche Auflösung (<1 Sekunde)**.
  - CPCs sind hier **eingeschränkt**, da ihre Reaktionszeit oft **>1 Sekunde** beträgt – Zudem sind CPCs wegen der Vibrationsempfindlichkeit, Temperaturabhängigkeit und dem Verbauchsmedium **nicht für RDE-Messungen geeignet** [18].

- **Lösung:**
  - Systeme mit **schneller Reaktionszeit** (z. B. DC, nicht geeignet, werden nicht für RDE eingesetzt) **gewinnen an Bedeutung gegenüber klassischen CPCs**.
  - **Robuste Messzellen**, die widerstandsfähig gegenüber Vibrationen und Temperaturschwankungen sind.
  - **Automatisierte Datenkorrekturmodelle**, um Störeffekte in Echtzeit zu kompensieren.

5.2.2 SENSORALTERUNG UND WARTUNG

- **Langzeiteinsatz und hohe Partikelbelastungen von Partikelzählern** können zu **Messwertabweichungen** und einem **Kalibrierdrift führen**.

- **Problem:**
  - **Ablagerungen in der Messkammer** (z. B. durch Ölnebel) verfälschen die Ergebnisse.
  - **Sensoren können durch hohe Partikelbelastung „verstopfen“** (insbesondere CPCs) [19].

- **Lösung:**
  - **Automatische Reinigungssysteme** oder **periodische Nullpunktkalibrierung** (wie bei PTI-Messungen vorgeschrieben) [4].

- **Alternative Technologien mit weniger Wartungsaufwand**, z. B. elektrostatische Sensoren (DC).

5.3 VERGLEICH VON LABOR- UND FELDMESSUNGEN

5.3.1 UNTERSCHIEDLICHE ERGEBNISSE ZWISCHEN PRÜFSTAND UND PRAXIS

- **Laborbedingungen:**
  - **Konstante Temperatur, definierte Luftfeuchte, kontrollierte Probenahme.**
  - Partikelverteilungen und Größenverteilungen sind **reproduzierbar** [5].

- **Praxismessungen:**
  - **Starke Schwankungen durch Fahrstil, Wetter und Umgebungsfaktoren.**
  - Messungen im **Freien (z. B. PTI-Messungen) führen oft zu höheren Variationen** [20][21].

5.3.2 KALIBRIERUNG UND REFERENZINSTRUMENTE

- **Herausforderung:**
  - **Partikelmessgeräte müssen regelmäßig gegen Referenzgeräte (CPCs, Elektrometer) kalibriert werden.**
  - **Abweichungen zwischen verschiedenen Geräten** können zu falschen Messinterpretationen führen [22][23].

- **Lösung:**
  - Verwendung **zertifizierter PN-Kalibratoren** für PTI und Forschungseinrichtungen.
  - **Vergleichsmessungen mit standardisierten Aerosolen**, um systematische Fehler zu minimieren.

Zusammenfassung und Ausblick

- Die **Umgebungsbedingungen** (Temperatur, Druck, Verdünnung) haben einen erheblichen Einfluss auf die **Genauigkeit der Partikelzählung**.

- **Mobile PN-Messungen (PEMS, PTI)** erfordern **schnelle, robuste und wartungsarme Messgeräte**.

- **Regelmäßige Kalibrierung** und **Vergleichsmessungen mit Referenzsystemen** sind entscheidend für zuverlässige PN-Daten.

Mit der Einführung neuer **Euro 7-Vorschriften** und einer verstärkten Überwachung durch **Real-Driving Emissions (RDE)** wird sich die Partikelzählung weiterentwickeln. Die Entwicklung **präziser, wartungsarmer und echtzeitfähiger PN-Sensoren** wird in Zukunft eine Schlüsselrolle spielen.

6 INNOVATIVE LÖSUNG: MET PC7.0 – PARTIKELZÄHLUNG MIT MAHA-TECHNOLOGIE

Mit den wachsenden Anforderungen an die **Partikelanzahlmessung (PN)** in der Abgasanalyse steigt der Bedarf an **präzisen, zuverlässigen und wartungsarmen Messsystemen.** Der Partikelzähler **MET PC7.0** von **MAHA**, bietet eine zukunftsweisende Lösung für verschiedene Anwendungen in der **Fahrzeugprüfung, Forschung und Emissionsüberwachung**.

Der Partikelzähler MET PC7.0 wurde speziell entwickelt, um die **Limitationen klassischer Messsysteme** zu überwinden und eine effiziente Alternative zu herkömmlichen **CPC-basierten Methoden** bereitzustellen. Durch den Einsatz modernster **elektrostatischer Messverfahren**, kombiniert mit **intelligenter Signalverarbeitung**, bietet der MET PC7.0 **hohe Präzision, kurze Reaktionszeiten und eine wartungsarme Funktionsweise**.

6.1 TECHNOLOGISCHER AUFBAU DES MET PC7.0

Der MET PC7.0 basiert auf einem **Diffusionsaufladungssensor (DC)** mit hochsensibler Elektrometermessung. Das System besteht aus den folgenden Hauptkomponenten:

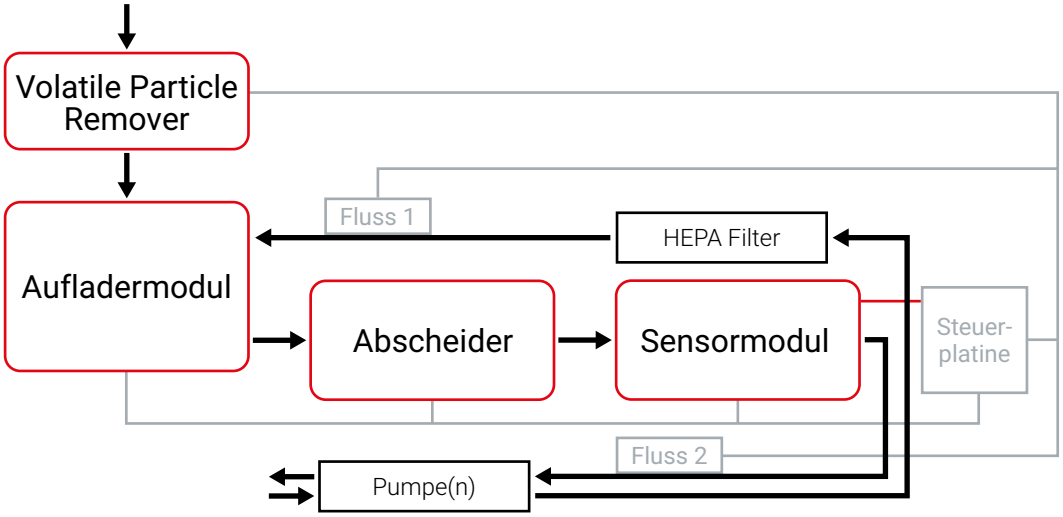

Abbildung 1: schematische Darstellung eines Partikel Messsystems aus vier Modulen mit Steuerplatine und Pumpe(n)

Volatile Particle Remover (VPR)

Der Volatile Particle Remover (VPR) entfernt flüchtige Bestandteile aus dem Messgas, um die Messung gesetzeskonform durchzuführen. Dieser ist erforderlich, da Partikelmessungen auf thermostabile, nicht-flüchtige Partikel beschränkt sein müssen. Mit einer Effektivität von rund 99 % übertrifft das System die gesetzlichen Mindestanforderungen, die in Deutschland beispielsweise bei mind. 90 % liegen.

Vorteile:

- Hoch effiziente Entfernung flüchtiger Bestandteile gewährleistet eine sehr präzise und gesetzeskonforme Partikelmessung

Aufladermodul – Diffusion Charger (DC)

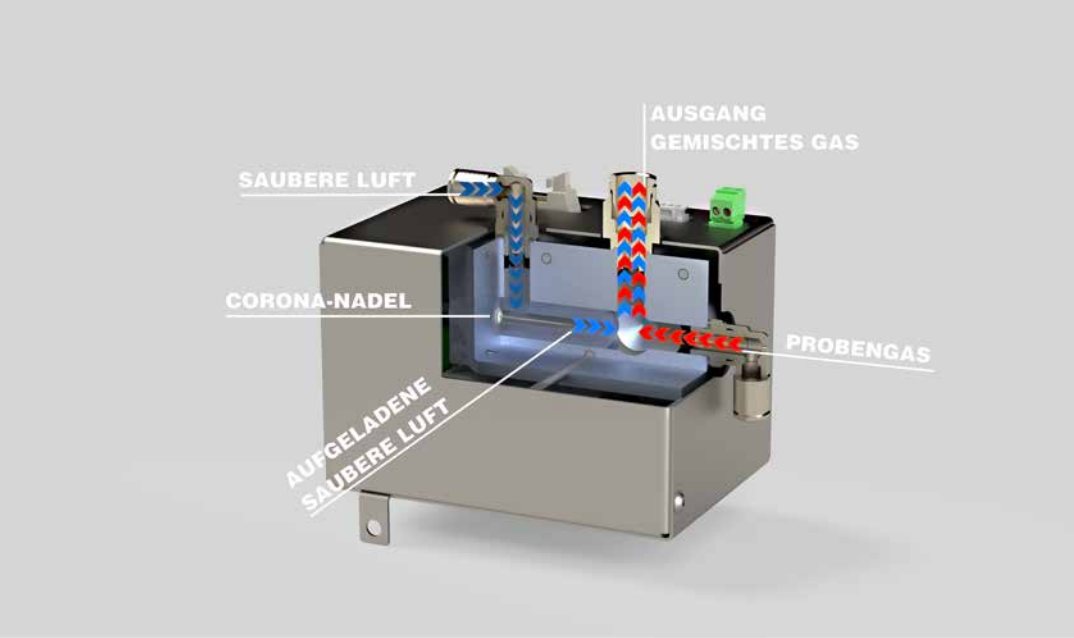

Abbildung 2: Aufladermodul - Diffusion Charger (DC)

Im Aufladermodul werden die Abgaspartikel mittels einer Corona-Entladung elektrisch geladen. Die „Clean Charging Technology" sorgt dafür, dass die Ionenbildung in sauberer, HEPA-gefilterter Luft erfolgt. Dadurch wird eine Verschmutzung der Corona-Nadel vermieden, was die Lebensdauer des Systems erhöht.

Vorteile:

- HEPA-gefilterte Luft zur Erzeugung der Ionen
- Wartungsarme Corona-Entladung mit langer Lebensdauer
- Eigendiagnose durch Ionenstrommessung, auch ohne Partikelpräsenz

Ionen-/Partikelabscheider

Abbildung 3: Ionen-/Partikelabscheider

Der Abscheider trennt freie Ionen sowie bestimmte Anteile der geladenen Partikel ab. Dies ermöglicht eine größenabhängige Korrektur der Zähleffizienz und eine Ermittlung der Partikelgrößenverteilung. Zudem kann das Modul so konfiguriert werden, dass es rein elektrische Funktionstests ohne Partikel durchführt.

Vorteile:

- Selektive Partikelgrößenfilterung durch elektrische Trennung
- Möglichkeit zum Funktionstest ohne Partikel

Sensormodul – Faraday Cup Electrometer

Abbildung 4: Sensormodul

Das Sensormodul erfasst die durch geladene Partikel induzierte Ladung und wandelt diese in eine Partikelanzahlkonzentration um. Dies geschieht berührungslos über einen Faraday Cup, der extrem geringe Ströme im Femtoampere (1 fA = 10^{-15} A)-Bereich messen kann.

Vorteile:

- Berührungslose Messung mittels Faraday Cup
- Robuste und hoch präzise Sensortechnik

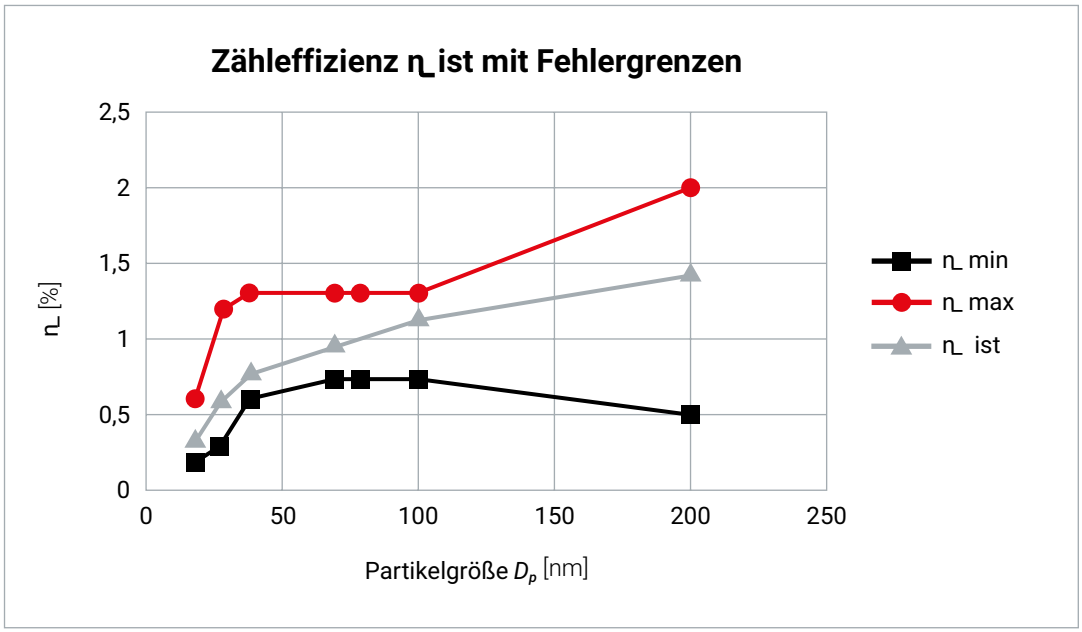

Abbildung 5: Zähleffizienz unseres Moduls sowie die vorgegebenen Grenzwerten η_min und η_max

6.2 VORTEILE DES MET PC7.0 GEGENÜBER BESTEHENDEN SYSTEMEN

MERKMAL	MET PC7.0 (MAHA-TECHNOLOGIE)	CPC
Arbeitsprinzip	Elektrostatische Ladungsmessung	Kondensationspartikelzählung
Empfindlichkeit	10 – 500 nm	7 – 1000 nm
Reaktionszeit	<200 ms	1 – 2 s
Wartungsaufwand	Sehr gering (keine Verbrauchsmedien)	Hoch (regelmäßiges Nachfüllen des Verbrauchsmediums)

Der MET PC7.0 überzeugt mit einer **schnellen Reaktionszeit**, sehr **robuster und präziser Messtechnik**, benötigt **keine wartungsintensiven Verbrauchsmedien** und **erfüllt alle** vorhandenen **gesetzlichen Vorgaben**.

6.3 ANWENDUNGSBEREICHE DES MET PC7.0

Der MET PC7.0 ist vielseitig einsetzbar und bietet eine präzise Partikelmessung in verschiedenen Szenarien:

PTI-Prüfstände

- Ermittlung der **Partikelanzahl gemäß gesetzlicher Anforderungen für Diesel-Fahrzeug**e mit Diesel-Partikelfilter.
- Vorbereitet für die einfache Integration in **bestehende Abgasprüfstände**.

Forschung & Entwicklung

- Optimierung von **Abgasnachbehandlungssystemen für niedrigere Emissionen**.
- Diagnosemessungen zur **Bewertung von Einflussfaktoren auf das Emissionsverhalten**.

6.4 VERGLEICHSMESSUNGEN UND VALIDIERUNG

Laborprüfungen gemäß PMP-Standard (23 nm Cut-Off)

- Der MET PC7.0 zeigte eine **exzellente Übereinstimmung mit PMP-zertifizierten CPCs** (Abweichung <7 %).
- **Hohe Reproduzierbarkeit**, insbesondere bei niedrigen Partikelkonzentrationen (<10^4 #/cm^3).

Langzeitstabilitätstests

- MET PC7.0 absolvierte über **1000 Betriebsstunden ohne nennenswerte Kalibrier-abweichungen**.
- **Wartungsarmer Betrieb**, während bei CPCs regelmäßig das Verbrauchsmedium nachgefüllt werden muss.

6.5 VARIANTEN DES MET PC7.0: BASIC UND COMFORT

Der MET PC7.0 ist in zwei Ausführungen erhältlich, um unterschiedliche Anforderungen in der Partikelzählung abzudecken:

MET PC7.0 BASIC

- **Verbindung** mit PC oder Laptop per **USB-C-Kabel** oder **Bluetooth**.
- Prüfabläufe und Bewertung über die **MAHA Emission Software (MES)**.
- **Ideal für stationäre Prüfstände, mobilen Einsatz und Forschungslabore**.

MET PC7.0 COMFORT

- **Integriertes Embedded-System**, das eine **softwaregestützte Bedienung** ermöglicht.
- **Kein externer PC erforderlich** – das Gerät kann **„Standalone“** betrieben werden.
- **Ideal für mobile Anwendungen** und **PTI-Prüfungen in Werkstätten**.

Diese beiden Varianten ermöglichen es, **den MET PC7.0 sowohl in klassischen Prüfständen als auch in mobilen Testumgebungen effizient einzusetzen**.

7 FAZIT UND AUSBLICK

Die **Partikelanzahlmessung (PN)** hat sich zu einem essenziellen Bestandteil der modernen Abgasuntersuchung entwickelt. Strengere gesetzliche Vorgaben, insbesondere im Rahmen der **Periodischen Technischen Inspektion (PTI)** und die Einführung neuer **Euro-7-Normen**, erfordern präzise, zuverlässige und einfach zu bedienende Messsysteme.

Die MET PC7.0-Geräte von **MAHA** stellen eine zukunftsweisende Lösung dar, die **höchste Messgenauigkeit mit maximaler Benutzerfreundlichkeit verbindet**. Durch die innovative **elektrostatische Messmethode** bieten die MET PC7.0-Geräte eine **wartungsarme Alternative zu herkömmlichen CPC-basierten Systemen**, ohne auf **Präzision und Reproduzierbarkeit** zu verzichten.

7.1 DIE WICHTIGSTEN VORTEILE DER MET PC7.0-GERÄTE

Präzise Partikelmessung für PTI, Forschung und mobile Anwendungen

- **Erfüllt alle gesetzlichen Vorgaben** für PN-PTI-Messungen.
- **Robuste Messtechnik**, die **besonders widerstandsfähig** gegenüber Verschmutzung und Flüssigkeitseintritt ist.
- **Ideal für Werkstätten, Prüforganisationen und Motorenentwickler**.

Zwei Varianten für maximale Flexibilität

- **BASIC-Version** mit **Bluetooth und USB-Schnittstelle** für **PC-gestützte Prüfungen mit MAHA MES-Software**.
- **COMFORT-Version mit integriertem Embedded-System**, ideal für **mobile Einsätze** und Standalone-Anwendungsfälle.

Hohe Stabilität und geringer Wartungsaufwand

- **Kein Verbrauchsmedium wie bei CPCs** – dadurch **längere Betriebszeiten ohne Wartung**.
- **Druck- und Temperaturkompensation** für **präzise Messwerte unter realen Bedingungen**.

Schnelle Messzeiten und Echtzeitfähigkeit

- **Reaktionszeit <200 ms**, ideal für **stationäre und mobile Messungen**.
- **Echtzeit-Diagnose** für effiziente Prüfabläufe.

7.2 ZUKUNFT DER PARTIKELZÄHLUNG MIT MET PC7.0

Integration in vernetzte Prüfstände

- **Anbindung an digitale Werkstatt- und Prüfsysteme** für **nahtlose Prüfprozesse** durch unser MES.

Für die Zukunft vorbereitet

- **Der MET PC7.0 ist bereit für globale Anwendungen in PTI-Systemen**, über die bestehenden PN-PTI-Vorgaben hinaus.
- **Anpassung an zukünftige Grenzwerte und Prüfstandards** für neue Fahrzeugtechnologien.

7.3 SCHLUSSWORT

Der MET PC7.0 ist mehr als nur ein weiteres Partikelmessgerät – es ist eine effiziente, wartungsarme, und präzise Lösung für die Partikelanzahlmessung von morgen. Mit seiner hohen Flexibilität, schnellen Reaktionszeit und zukunftssicheren Technologie bietet es eine ideale Grundlage für gesetzliche Prüfungen, Forschung und mobile Anwendungen.

Mit MAHA an der Spitze der Innovation wird der MET PC7.0 einen wichtigen Beitrag zur Abgasuntersuchung und Luftreinhaltung leisten.

Quellenverzeichnis

[1] **Karjalainen, P., Saari, S., Nuutinen, I., Kuuluvainen, H., Kousa, A., Koskentalo, T., Rönkkö, T., Timonen, H. and Niemi, J.V. (2021)**
Auxiliary heaters as an unregulated source of particles in vehicular emissions', Atmospheric Environment, 246, 118104.
https://doi.org/10.3390/atmos12091105?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

[2] **Giechaskiel, B., van der Gon, H.A.C.D., Jörgl, H., Ntziachristos, L., Ristovski, Z., Samaras, Z., Suckow, S. and Whitefield, P.D. (2019)**
Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number', Journal of Aerosol Science, 127, pp. 18-48.
https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.09.003

[3] **Li, Y., Liu, H., He, C., Ge, Y., Wang, X., Ma, Z. and Tan, J. (2024)**
Evaluation of portable emission measurement systems for particle number emissions from vehicles under real-world driving conditions', Journal of Physics: Conference Series, 2244(1), 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/2244/1/012003.

[4] **United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (2011)**
Particle Measurement Programme (PMP): Heavy duty inter-laboratory correlation exercise', Final Report.
https://digitallibrary.un.org/record/684773?ln=en

[5] **European Commission Joint Research Centre (2018)**
Particle Measurement Programme (PMP): Inter-laboratory correlation exercise with condensation particle counters (CPCs)', EUR 29277 EN. DOI: 10.2760/859241
https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC112336

[6] **VDA – Verband der Automobilindustrie (2011)**
Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen'.
https://www.vda.de/dam/jcr:561894d4-7548-4d79-a41b-4b47707a9c79/1326894151_de_1142457151.pdf

[7] **ResearchGate (2015)**
Abgaspartikelmessmethoden und Auswirkung der Abgasnachbehandlung auf die Partikelanzahl-emissionen'.
https://www.researchgate.net/publication/260408634_Abgaspartikelmessmethoden_und_Auswirkung_der_Abgasnachbehandlung_auf_die_Partikelanzahlemissionen

[8] **Academia.edu (2015)**
Abgaspartikelmessmethoden und Auswirkung der Abgasnachbehandlung auf die Partikelanzahl-emissionen'.
https://www.academia.edu/31656569/Abgaspartikelmessmethoden_und_Auswirkung_der_Abgasnachbehandlung_auf_die_Partikelanzahl-emissionen

[9] **UNECE (2021)**
UNECE PMP IWG Terms of Reference'.
https://wiki.unece.org/download/attachments/123667515/UNECE%20PMP%20IWG%20ToR%20new%20draft%20_24_03_2021-1%20Clean.docx?api=v2

[10] **KIT - Karlsruher Institut für Technologie**
Untersuchung der Partikelemissionen für unterschiedliche Einspritzstrategien an einem aufgeladenen Ottomotor mit Direkteinspritzung.
https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000098722

[11] **ScienceDirect**
Characterizing the particle number emissions of light-duty gasoline vehicles under different engine technologies and driving conditions.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935122009756?via%3Dihub

[12] **npj Clean Air**
Real world particle size distribution from vehicle fleet and implication on emission control
https://www.nature.com/articles/s44407-025-00007-8

[13] **ScienceDirect**
Solid particle number emissions of 56 light-duty Euro 5 and Euro 6 vehicles
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850221006029?via%3Dihub

[14] **ScienceDirect**
Characterizing the particle number emissions of light-duty gasoline vehicles under different engine technologies and driving conditions
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935122009756?via%3Dihub

[15] **VDA – Verband der Automobilindustrie (2023)**
Euro 7-Beschluss verbindet Verbesserung der Luftqualität mit Realisierbarkeit für die Industrie
https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2023/231218_PM_Euro7-Beschluss-verbindet-Verbesserung-der-Luftqualit-t-mit-Realisierbarkeit-f-r-die-Industrie

[16] **Europäische Kommission**
Neue Abgasnorm Euro-7: Die Fakten
https://germany.representation.ec.europa.eu/neue-abgasnorm-euro-7-die-fakten_de

[17] **AAQR – Aerosol and Air Quality Research (2019)**
Chemical Characterization of Fine Particulate Matter in Gasoline and Diesel Vehicle Exhaust
https://aaqr.org/articles/aaqr-19-04-oa-0191

[18] **HELDA (2018)**
On the time response determination of condensation particle counters
http://hdl.handle.net/10138/308191

[19] **Taylor & Francis Online (2018)**
On the time response determination of condensation particle counters
https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2018.1460458

[20] **SAE Mobilus (2018)**
Improvement of Thermal Efficiency in a Diesel Engine with High-Pressure Split Main Injection
https://doi.org/10.4271/2018-01-1791

[21] **Taylor & Francis Online (2010)**
Gas-Wall Partitioning of Organic Compounds in a Teflon Film Chamber and Potential Effects on Reaction Product and Aerosol Yield Measurements
https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2010.501044

[22] **SAE Mobilus (2018)**
Improvement of Thermal Efficiency in a Diesel Engine with High-Pressure Split Main Injection
https://doi.org/10.4271/2018-01-1791

[23] **Taylor & Francis Online (2010)**
Gas-Wall Partitioning of Organic Compounds in a Teflon Film Chamber and Potential Effects on Reaction Product and Aerosol Yield Measurements
https://doi.org/10.1080/02786826.2010.501044

Über den Autor

Peter Geigle verfügt über mehr als 25 Jahre Erfahrung in Technologie- und Produktentwicklung. Der promovierte Mathematiker und studierte Elektrotechniker hat zahlreiche Unternehmen durch Transformationen begleitet und innovative Technologien etabliert. Seine Schwerpunkte liegen in der Entwicklung neuer Technologien, Unternehmensrestrukturierung und internationaler Führung.

„Erfahren Sie mehr über die Herausforderung der präzisen Partikelanzahlmessung – und über innovative Lösungen dafür – in diesem Whitepaper."

Dr. Peter Geigle

Geschäftsführer MAHA SE & Co. KG

E-Mail: peter.geigle@maha.de

MAHA SE & Co. KG
Hoyen 20
87490 Haldenwang
Germany

maha.de