



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Målemetoder til kontrol af eftermonterede partikelfiltre på tunge køretøjer

Lars K. Gram og Karsten Fuglsang
FORCE Technology

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

| | |
|--|-----------|
| FORORD | 5 |
| SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER | 7 |
| 1 BAGGRUND | 11 |
| 2 NUVÆRENDE REGLER (MILJØZONER) | 13 |
| 2.1 NUVÆRENDE REGLER (MILJØZONER) | 13 |
| 2.2 TOMGANG, FRI ACCELERATION ELLER FULDLAST | 14 |
| 3 BESKRIVELSE AF DIESEL PARTIKELFILTRES VIRKEMÅDE | 15 |
| 3.1 BESKRIVELSE AF DIESELPARTIKELFILTRES VIRKEMÅDE | 15 |
| 3.2 SKADEDE FILTRES BETYDNING FOR EMISSIONEN | 17 |
| 3.2.1 Revner i filtret | 17 |
| 3.2.2 Huller i filteret | 20 |
| 4 BESKRIVELSE AF MÅLEPRINCIPPER | 23 |
| 4.1 PRØVEUDTAGNING OG KØRETØJSBELASTNING | 23 |
| 4.1.1 Måling direkte i udstødningsskassen | 23 |
| 4.1.2 Fortyndingstunnel og chassis dynamometer / prøvebænk | 23 |
| 4.1.3 Transportable fortyndingsenheder | 24 |
| 4.1.4 Sammenfatning af prøvetagnings metoder | 26 |
| 4.2 GENERELT OM PARTIKLER , OPACITET, MASSE OG ANTAL | 26 |
| 4.3 OPACITET | 27 |
| 4.3.1 Bosch BEA 080 //, opacitet ved lysspredningsmåling | 30 |
| 4.3.2 AVL DiTEST Smoke 2000 | 32 |
| 4.3.3 MAHA Laser Light-Scattering Photometry (LLSP). Opazimeter II. Generation MET 6.2 // | 33 |
| 4.4 SODPLET (SMOKEMETER) | 34 |
| 4.5 PARTIKELANTAL OG PARTIKELMASSE | 34 |
| 4.5.1 TSI's P-TRAK, CPC Condensation Particle Counter | 34 |
| 4.5.2 TSI's DUSTTRAK, lyssprednings princip | 35 |
| 4.5.3 MAHA's MPM 4, lyssprednings princip | 36 |
| 4.6 PEGASOR PARTICLE SENSOR // | 37 |
| 4.7 CMBUSTION DIFFERENTIAL MOBILITY SPECTROMETER DMS 500 OG DMS 50 | 38 |
| 4.8 AVL MICRO SOOT SENSOR | 39 |
| 4.9 MANUELLE METODER | 40 |
| 4.9.1 Manual gravimetrisk måling | 40 |
| 4.9.2 Visuel inspektion | 40 |
| 4.10 LIDT OM OBD (ON-BOARD DIAGNOSTICS) | 41 |
| 4.11 OVERSIGT UDVALGTE MÅLEMETODER TIL PARTIKELMASSE OG PARTIKELANTAL | 42 |
| 5 VURDERING AF DEN NUVÆRENDE KONTROLMETODES EGNETHED, HERUNDER ALTERNATIVE METODER | 45 |
| 5.1 TRADITIONELLE METODER | 45 |
| 5.2 LYSSPREDNINGSTEKNIKKEN | 46 |
| 5.3 ANDRE ALTERNATIVE MÅLEPRINCIPPER | 46 |
| 6 KONKLUSION | 49 |

Forord

Denne rapport beskriver de nuværende og evt fremtidige målemetoder, der kan benyttes til efterkontrol af tunge diesel køretøjer.

Formålet med rapporten er:

1. At vurdere pålideligheden af den nuværende metode til røggasmåling (opacitet), som bruges ved syn som indikator for partikeludslip fra tunge køretøjer med eftermonterede dieselpartikelfiltre (DPF) i henhold til principgodkendelsen af DPF/1/.
2. At beskrive skadede filters betydning for emissionen.
3. At undersøge og beskrive mulige alternativer til målingen af røggasværdi ved periodesyn af tunge køretøjer.

Herudover arrangeres der en workshop, hvor den tilgængelige viden om målemetoder fremlægges og mulige fremtidige målemetoder til kontrol af partikelfiltre diskuteres.

Sammenfatning og konklusioner

Rapporten gennemgår nuværende og alternative målemetoder til synskontrol af tunge kørestøjer. I den forbindelse ses der også på emissioner fra skadede filtre. Rapportens hovedkonklusioner fremgår af det følgende:

Euro normer, kontrolværdier og dieselpartikelfiltre

- Principgodkendelsen (der ligger til grund for tilladelsen til at køre i miljøzonen) stiller krav om en 80 % reduktion uanset grundbelastning (dvs. Euro I, II eller III før filter). Kontrolværdien ved periodisk syn er en fast værdi, og er således udelukkende en kontrol af et emissionsniveau.
- Kontrolværdien ved syn er baseret på en 80 % reduktion af massen fra en Euro I motor. De fleste tunge køretøjer med eftermonterede filtre har Euro III motorer. Euro IV har automatisk lov til at køre ind i miljøzonerne, men de kontrolleres dog ved den periodiske kontrol. Udviklingen i motorer betyder, at den emission der passerer gennem et 80 % effektivt filter på en Euro I motor kan være væsentlig højere end den emission der passerer gennem et tilsvarende effektivt filter monteret på en nyere motor. Moderne motorer med et meget skadet filter eller uden filter vil kunne overholde kontrolværdien ved syn på $0,2 \text{ m}^{-1}$ (ca. 24 % af Euro III køretøjer uden filter er under $0,2 \text{ m}^{-1}$ ved syn /29/). Generelt vil moderne motorer med et velfungerende filter ligge meget langt under kontrolværdien. Det kan således ikke ved periodisk syn påvises om filteret på en nyere motor har 80 % reduktion, men udelukkende om niveauet er under eller over kontrolværdien på $0,2 \text{ m}^{-1}$.

Målemetoder

- Metoder til efterkontrol skal kunne eftervise et emissionsniveau på $0,2 \text{ m}^{-1}$. Når køretøjer typegodkendes eller testes i en prøvestand mv. benyttes mere præcise målemetoder og der opereres med kontrolværdier i g/kWh. Da gasmængden varierer med belastningen af motoren vil metoder der måler koncentration (opacitet (m^{-1}), masse (mg/m^3) eller antal ($\#/ \text{m}^3$)) ikke kunne sammenlignes med værdier i g/kWh. Det er dog et krav, at kontrolmetoden skal give reproducerbare resultater. I praksis er kontrolmetoden en kontrol af et emissionsniveau ikke en kontrol af om filteret virker.
- De traditionelle målemetoder kan måle ned til omkring kontrolværdien, men ikke længere ned, og med en betydelig usikkerhed. I praksis betyder det, at der kan være køretøjer der godkendes selvom de har en emission der ligger lidt over kontrolværdien. Samtidig kan det med sikkerhed siges at de køretøjer der overskrider kontrolværdien uden tvivl har et skadet filter.
- Samlet set betyder det, at ingen vognmænd tvinges til at skifte filter på køretøjer der overholder kontrolværdien, men at der er en vis risiko for at køretøjer med en overskridelse får tilladelse til at køre i miljøzonen. Meget skadede filtre vil stadig opdages ved syn.
- Der er alternative metoder på vej, som vil være væsentlig bedre i stand til at kontrollere både den nuværende kontrolværdi og evt. skærpede kontrolværdier i enheden m^{-1} .

- Der er en lang række alternative målemetoder og principper. Fælles for de fleste af disse er, at de er beregnet til andre formål end efterkontrol i en synshal. De kan hver for sig være yderst velegnet til deres formål, men vil være vanskelige at benytte til efterkontrol, enten pga. pris, krav om uddannet personale, rengøring, anvendt måleenhed etc.
- Metoder der måler antal og metoder der måler masse kan ikke sammenlignes uden detaljeret kendskab til partiklernes sammensætning og densitet.
- DUST-TRAK og P-TRAK kan ikke anvendes til at måle direkte i udstødningen. De er begge udmærkede målemetoder, men med et andet formål end udstødningsmålinger. Instrumenterne kan ikke tåle vanddamp og høj temperatur og kræver derfor en fortynding af udstødningsgassen. Dette kan opnås ved at placere måleren lidt væk fra udstødningen, men det er umuligt at sige hvor meget røggassen bliver fortyndet ved denne metode. Fremgangsmåden kan kun i bedste fald give en indikation af niveauet i udstødningen og vil derfor ikke være velegnet til kontrolmåling ved syn. P-TRAK har i øvrigt en øvre målegrænse der muligvis nås allerede før kontrolværdien overskrides.

Skadede filtre

- En undersøgelse viser at selv et filter med to gennemgående revner har en meget høj effektivitet over 89 % masse reduktion.
- En undersøgelse angiver at et filter med 100 % af endepropperne fjernet (svarende til et filter, hvor gassen kan passere igennem uden at skulle trænge igennem filtermaterialet) har en effektivitet på 32 til 36 % ved kørsel. Variationen skyldes at mængden af sodpartikler opsamlet på filteret har en positiv effekt på effektiviteten. Samme undersøgelse påpeger at filtre med huller kan have en "blow-off effekt" ved regenerering, hvilket vil sige at en del af de opsamlede partikler ikke brændes af ved regenerering men emitteres i stedet (men nu formentlig med en mere ufarlig partikelstørrelsesfordeling).

Fremtidig kontrol

- Indtil videre anbefales det at fastholde det nuværende kontrolsystem, som opdager meget skadede filtre og dermed sikrer et generelt lavt niveau. Det bør overvejes at skifte til lysspredningsteknikken, når den er tilgængelig kommercielt.
- En mulighed for at skærpe kontrollen og dermed udslippet af dieselpartikler i byerne er en lavere kontrolværdi kombineret med lysspredningsteknikken.
- Det bør endvidere overvejes om der skal indføres en differentieret kontrolværdi (forskellige kontrolværdier for de forskellige Euro motorer), der svarer bedre til principgodkendelsens krav om 80 % reduktion.
- Beslutningen om en evt. skærpelse af kontrolværdien samt skift af målemetode ved syn bør afvente resultaterne fra TEDDIE undersøgelsen, der forventes afsluttet med udgangen af 2011 /43/.
- En alternativ vej til at reducere antallet af ultrafine partikler i byerne er at fastsætte en kontrolværdi ved syn baseret på antal af partikler. Pt. vurderer vi at der ikke er velegnede målemetoder til efterkontrol af en sådan kontrolværdi. Metoderne er udviklet, men det bliver uforholdsmæssigt dyrt at indkøbe og betjene dem korrekt i synshallerne.

Vejsidekontrol

- En del af de alternative metoder, der er beskrevet i denne rapport (herunder især P-TRAK i kombination med et fortyndingsudstyr og MPM 4) kan potentielt anvendes ved fx vejsidekontrol med efterfølgende indkaldelse til ekstra synskontrol. Generelt kræver de alle en nøje beskrivelse af hvordan metoden håndteres i praksis, herunder definition af den værdi som måleren skal vise før køretøjet indkaldes til ekstra kontrol. Sandsynligvis er det også nødvendigt at kalibrere målerne overfor dieselpartikler.

1 Baggrund

I danske og tyske medier er der blevet rejst tvivl om hvorvidt den anvendte kontrol metode til kontrol af dieselpartikelfiltre er tilstrækkelig. Påstanden har været at defekte filtre passerer kontrollen uopdaget. Miljøstyrelsen har derfor anmodet FORCE Technology om at undersøge metodens begrænsninger, beskrive alternative metoder samt at vurdere om den alm. benyttede metode er tilstrækkelig til at kontrollere den eksisterende kontrolværdi.

Der findes en lang række forskellige måleprincipper til at bestemme antal og masse af luftbårne partikler. Her beskrives et par af de mest hyppigt anvendte principper, som har været anvendt til måling af udslip fra diesel partikelfiltre fra motorer og på ibrugtagne køretøjer (den såkaldte efterkontrol).

Det er væsentligt at skelne imellem den type målinger, der udføres som typegodkendelse af nye biler, og efterkontrol på ibrugtagne biler:

- Typegodkendelsen udføres på foranledning af bilproducenterne af et certificeret laboratorium (hvoraf der findes ganske få i Europa og ingen i Danmark), og typegodkendelsen udføres efter et regelsæt, der er meget detaljeret og omfattende. For kontrol af partikeludslip fra dieseldkøretøjer udføres målingerne under typegodkendelsen såvel for masseudslippet (måles typisk i g/km for personbiler og i g/kWh for tunge køretøjer), samt – efter indførelsen af Euro V+ og Euro VI reglerne fra 2015 – for partikelantallet (måles i antal partikler pr. km). Partikelantallet måles i henhold til den såkaldte PMP (Particle Measurement Programme) protokol. En nærmere beskrivelse af testen ved typekontrol findes i afsnit 4.1.2.
- Efterkontrol udføres på ibrugtagne biler, typisk i forbindelse med det periodiske syn, som tunge køretøjer gennemgår årligt. Efterkontrollen udføres af godkendte synsværksteder. Kontrollen af partikeludslip fra dieselmotorer udføres ved hjælp af relativt simple instrumenter, der måler ”røgtætheden” (opaciteten). Denne målemetode er foreskrevet i EU's direktiv 96/96 /2/ og har været anvendt i mere end 20 år. Røgtætheden eller opaciteten kan tilnærmet anvendes som udtryk for den emitterede masse af partikler, dog kun fra en vis nedre grænse.

Miljøzonekontrol af dieselpartikelfiltre udføres på samme måde som den generelle efterkontrol af partikeludslip, og miljøzonekontrollen anvender følgelig den traditionelle opacitetsmåling.

I det følgende fokuseres på opacitetsmålingen til efterkontrol. Opacitetsmålingen er, som det fremgår af ovenstående, ikke udviklet til måling på meget lave partikeludslip, og dette har givet anledning til en drøftelse af metodens anvendelighed til efterkontrol på udslip efter dieselpartikelfiltre.

Desuden beskrives mulige, alternative målemetoder til efterkontrol på dieselpartikelfiltre.

2 Nuværende regler (miljøzoner)

2.1 Nuværende regler (miljøzoner)

Lovgrundlaget for miljøzoner i Danmark er beskrevet i Bekendtgørelse om Miljøzoner /3/. Kontrolværdien for tunge køretøjer på $0,2 \text{ m}^{-1}$ kan findes i Færdselsstyrelsens meddelelse nr. 1898 fra 2007 /4/: For køretøjer med partikelfilter må den målte røggasværdi ved fri acceleration jf. Vejledning om syn af køretøjer afsnit 7.06.020 (4) ikke overstige $0,2 \text{ m}^{-1}$. Måleenheden m^{-1} kaldes også en k-værdi og er den måleenhed, der udlæses ved en opacitetsmåling.

Kontrolværdien er fastsat under hensyn til, at alle køretøjer med et velfungerende partikelfilter skulle kunne godkendes/5/. Datagrundlaget for denne kontrolværdi er et storskalaforsøg med partikelfiltre til tunge dieselmotorer i Odense fra 2002 /6/, hvor der er anvendt en Euro I motor for at sikre maksimal belastning af filteret under testen. Testen er udført med en fortyndingstunnel efter ISO 8178/18/. På baggrund af resultaterne fra denne undersøgelse blev det vurderet, at en reduktion af partikelmassen med ca. 80 % svarede nogenlunde til en målt opacitet på $0,2 \text{ m}^{-1}$ målt ved fri acceleration.

Miljøzonekravet på $0,2 \text{ m}^{-1}$ er således fastsat på baggrund af en ønsket massereduktion over filteret.

Kontrolværdien ved syn er sat på et niveau, så Euro I motorer med et velfungerende filter (min. 80 % effektivitet målt som masse) med sikkerhed kan godkendes ved det periodiske syn. Hermed kan det ikke udelukkes, at enkelte køretøjer med en effektivitet lidt under 80 % kan passere det periodiske syn. Det er en naturlig følge af dette forhold, at den emission der passerer gennem et 80 % effektivitet filter på en Euro I motor kan være væsentlig højere end den emission der passerer gennem et tilsvarende effektivt filter monteret på en nyere motor. Det kan ikke udelukkes at moderne motorer med et meget skadet filter (eller evt. helt uden filter) vil kunne overholde kontrolværdien ved syn på $0,2 \text{ m}^{-1}$. Generelt vil moderne motorer med et velfungerende filter ligge meget langt under kontrolværdien.

Principgodkendelsen (der ligger til grund for tilladelsen til at køre i miljøzonen) stiller krav om en 80 % reduktion uanset grundbelastning (dvs. Euro I, II eller III før filter). Periodisk syn er således udelukkende en kontrol af om filteret er velfungerende (kontrol af et emissionsniveau).

Et Euro IV køretøj har automatisk tilladelse til at køre ind i miljøzonen, men bliver dog testet ved periodisk syn.

For Euro II og Euro III motorer kan der således være en meget stor forskel på det emissionsniveau der svarer til de 80 % reduktion fra principgodkendelsen og det emissionsniveau der svarer til kontrolværdien ved syn. I praksis vil dette betyde at fx en god Euro III med et skadet filter kan passere syn, samtidig med at den ikke er OK i henhold til principgodkendelsen. Dette betyder endvidere at principgodkendelsen ikke kan eftervises ved syn.

En k-værdi på $0,2 \text{ m}^{-1}$ svarer nogenlunde til en massekoncentration på ca. 30 mg/m^3 (ekstrapoleret fra MIRA Report No 1965/10 /7/)

Kontrolværdien kontrolleres ved efterkontrol ved fri acceleration:

11.02.004 Dieslrøgtæthed (fri acceleration)

(1) Målingen af røgtæthed (lysabsorptionskoefficient) foretages, medens motoren accelereres maksimalt fra tomgangsomedrejningstal til det regulerede højeste omdrejningstal. Målemetoden er nærmere fastsat i direktiv 96/96/EF som ændret ved 1999/52/EF.

Ordlyden i Vejledning om syn af køretøjer /8/

I Teknologisk Instituts Miljørapport om miljøzoner i EU/9/ fremgår det, at stort set samtlige miljøzoneregler har en kontrolværdi i m^{-1} målt med en opacitetsmåler (se afsnit 4.1) ved fri acceleration. Den danske kontrolværdi på $0,2 \text{ m}^{-1}$ er den laveste i de undersøgte lande (England har for Euro III samme kontrolværdi som Danmark). Tyskland overvejer en kontrolværdi på samme niveau eller lavere.

2.2 Tomgang, fri acceleration eller fuldlast

Test af opacitet ved fri acceleration er obligatorisk for dieslbiler ved det periodiske syn.

I diverse busselskabers miljøsynsmanualer /10/ angives et krav på $0,2 \text{ m}^{-1}$ målt ved fuld acceleration på vandret vej fra stilstand og op til 80-90 km/h eller alternativt på et belastningsrullefelt (op til 80 km/h). En sådan test belaster filteret mere end ved fri acceleration. En sådan test tager omkring $\frac{1}{2}$ time.

Teknologisk Institut angiver i Miljøzonerapporten /9/ følgende:

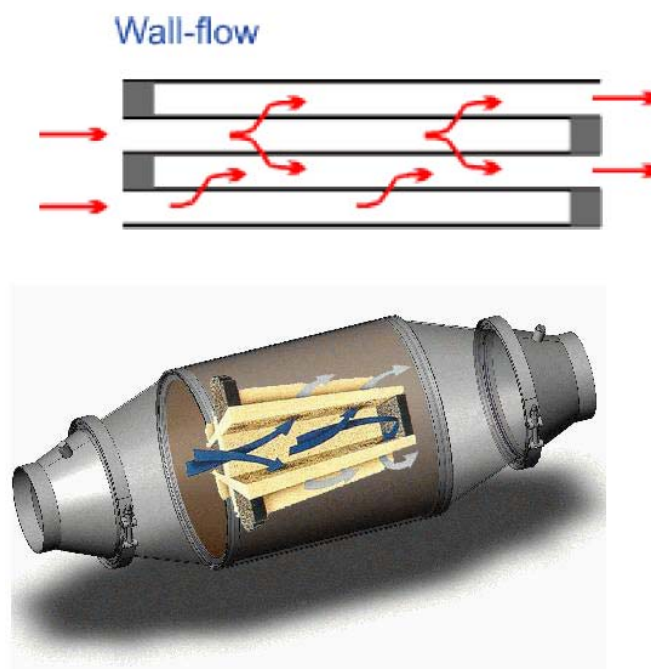
En typisk Euro III motor uden filter ligger omkring $0,2 \text{ g/m}^3$ i tomgang op til ca. $2,0 \text{ g/m}^3$ ved fuld last.

Da der ved fuld last også er mere røggas svarer dette til at der er omkring 30-40 gange så stor belastning af filteret ved fuld last. Belastningen af filteret ved fri acceleration ligger et sted midt i mellem men formentlig tættest på fuld-last. Ved fri acceleration topper opaciteten som regel ved lave omdrejninger. Det er klart, at der kan forventes højere emission efter filteret ved højere belastning af filteret. Den højere belastning er uden den store betydning for velfungerende filtre, som reducerer med tæt på 100 %, men for skadede filter med en ringere effektivitet, giver fuld-last også højere k-værdier efter filteret. I praksis kan det betyde, at et køretøj, som overholder en k-værdi på $0,2 \text{ m}^{-1}$ ved fri acceleration måske ikke vil overholde denne ved fuld last.

3 Beskrivelse af diesel partikelfiltres virkemåde

3.1 Beskrivelse af diesel partikel filteres virkemåde

De dieselpartikelfiltre, der benyttes på tunge køretøjer i miljøzonerne, er lukkede filtre. Et lukket dieselpartikelfilter virker ved, at udstødningsgassen tvinges gennem et filter som vist på Figur 1. Gasserne tvinges til at strømme gennem cellevæggene for at slippe igennem filtret (wall flow). Da cellevæggene er porøse, kan gasserne slippe igennem, mens partiklerne aflejres i cellevæggene. Dermed kan man opnå, at næsten 100% af partiklernes masse tilbageholdes på filteret.

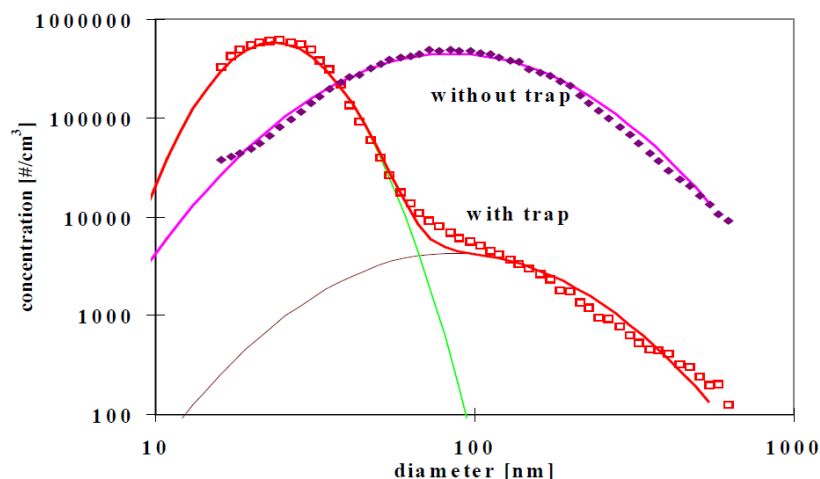


Figur 1 Opbygningen af et lukket dieselpartikel filter. Kilde: Majewski /11/ og DCL Inc. /12/.

Så længe cellerne i filteret er lukkede, vil man have 100 % wall flow og dermed den mest effektive filtreringsmekanisme, hvorved de største partikler (> 200 nm) fanges ved impaktion (dvs. som følge af at de er tunge nok til at afsættes når gasstrømmen afbøjes under filtreringen, og de mindste partikler (< 200 nm) samtidigt afsættes ved diffusion, idet de påvirkes af gasmolekylernes brownske bevægelser. Afsætningen ved diffusion bliver større jo mindre partiklerne er, og jo varmere gassen er. Der bygges hurtigt en filterkage op, som medvirker til at forbedre filterets effektivitet. Filteret regenereres med jævne mellemrum ved at filterkagen brændes af, hvorved filteret kortvarigt (ca. 10-15 minutter) har en dårligere effektivitet indtil filterkagen er opbygget igen. Ntziachristos et al. /13/ angiver at perioder med lav effektivitet ($< 95\%$) som skyldes regenerering svarer til omkring $1/150$ af køretiden, hvilket er uden miljømæssig betydning. Hvis filteret beskadiges, og der skabes åbne kanaler, får man en "flow through" situation i de pågældende kanaler, og dette vil øge

partikeludslippet. I hvor høj grad skader på filteret påvirker partikelemissionen er beskrevet i afsnit 3.2.

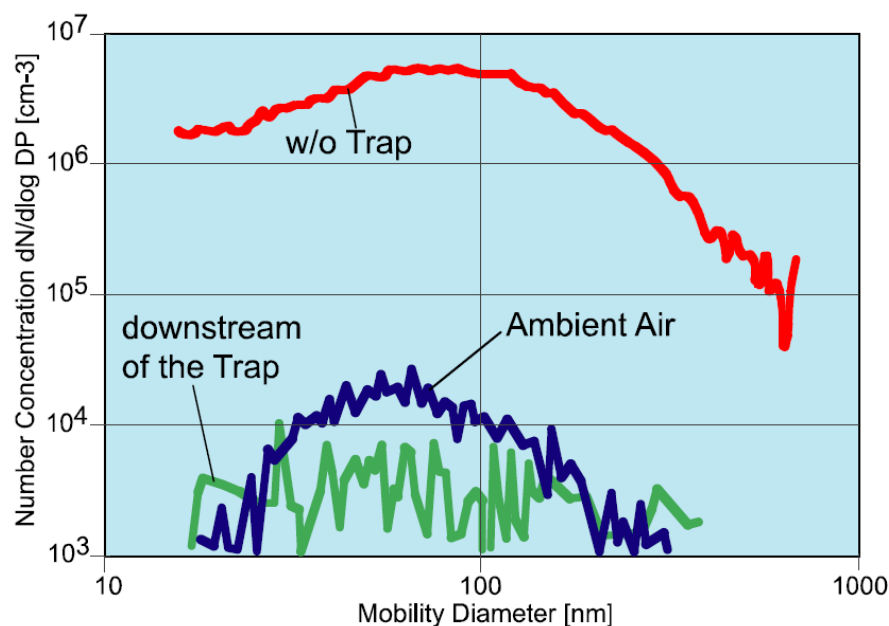
Et eksempel, der viser hvilken størrelsesfordeling af partiklerne man kan finde i udstødningen fra en dieselmotor med og uden dieselpartikelfilter er vist i Figur 2. Det skal bemærkes, at den top af semi-volatile forbindelser¹, der efter filteret optræder som kondensationskerner <30 nm, kan reduceres væsentligt i de nyere filtre med katalytisk coating, idet den katalytiske coating typisk vil oxidere de organiske forbindelser /11/.



Figur 2 Typiske partikelstørrelsesfordelinger i udstødningen fra en dieselmotor med (with trap) henholdsvis uden (without trap) dieselpartikelfilter. Når de faste bestanddele i partiklerne fjernes i filteret (dvs. partikler bestående af f.eks. elementar carbon og askepartikler), kondenserer semi-volatile partikler ud som ultrafine væskepartikler. Trods det, at den røde kurve (with trap) viser højere antal meget små partikler (< 30 nm), dannes der altså ikke nyt materiale efter filteret – de semi-volatile forbindelser kondenserer blot som små kondensationskerner, da de ikke længere har nogen større partikler at kondensere på. Toppen af små partikler måles med på instrumenter, der kræver fortynding og som kan se partikler under 100 nm fx P-TRAK se afsnit 4.5.1. Toppen af små partikler ses ikke på opacitetsmålere (både traditionelle og lyssprednings instrumenter), der ikke kan se de partikler mindre end ca 50-100 nm Se afsnit 4.3. Kilde: Burtscher /14/.

Toppen af semi-volatile partikler dannes, hvis gassen køles i en fortyndingstunnel inden måling. Hvis gassen køles i måleren fx til 100 °C vil de semivolatile partikler delvist dannes. Ved anvendelsen af den såkaldte PMP-protokol sikres det at toppen af semivolatile partikler ikke dannes og alle målemetoder vil "se" partiklerne som vist på Figur 3. Det skal understreges at visse målemetoder ikke kan "se" partikler mindre end fx 100 nm. Disse prøvetagningstekniske og måletekniske forhold er beskrevet i afsnit 4.

¹ Semi-volatile forbindelser vil typisk bestå af organiske forbindelser og - i det omfang svovl er til stede i brændstoffet – svovlsyre.



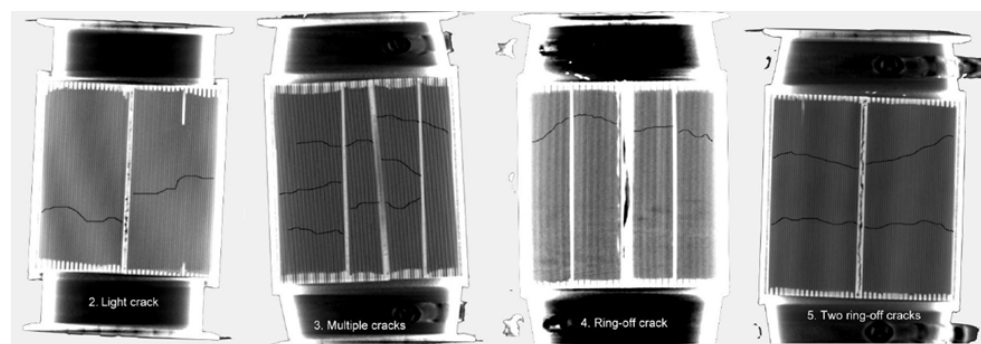
Figur 3. Størrelsesfordeling for partikler i udstødningen med og uden dieselpartikel filter, målt efter PMP protokol len, eksklusiv semi-volatile partikler. Den røde kurve (w/o trap) viser antal let af partikler målt uden DPF, den grønne kurve (downstream of the trap) viser partikel antal let efter DPF på et vel fungerende fil ter. Til sammenligning er det typiske antal af partikler i udeluft (bymiljø) vist. Kilde: Mayer /15/.

3.2 Skadede fil tres betydning for emissionen

Der er lavet flere undersøgelser, hvor det undersøges hvad der sker med partikelemissionen når et filter er skadet. Den mest typiske skade på et filter er revnedannelse, som skabes pga. af termisk chok. En anden skade kan være deciderede huller i filteret.

3.2.1 Revner i filtret

Ntziachristos et al. /13/ har undersøgt 4 forskellige typiske revnedannelser i et diesel partikel filter.

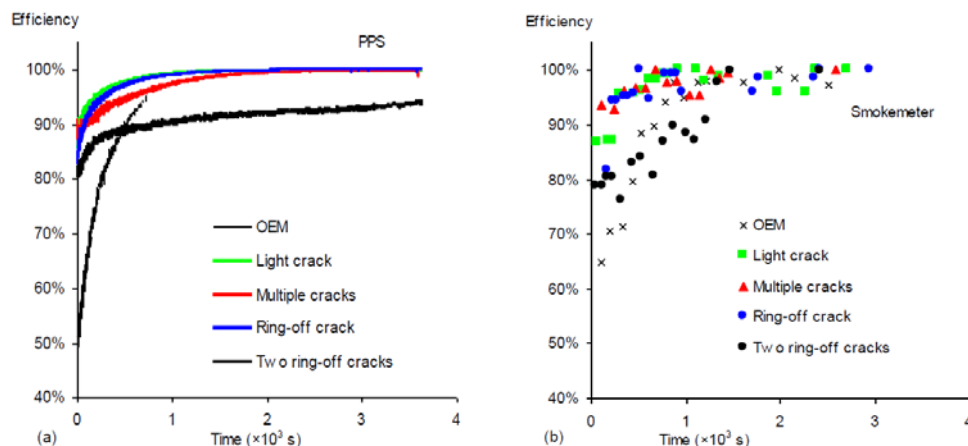


Figur 4 X-CT scanninger af skadede fil tre. 2: mindre revner, 3: mange revner, 4: gennemgående revne, 5: to gennemgående revner. Fra /13/

Disse skadede filtre er testet i en motor og i et køretøj efter NEDC (New European Driving Cycle).

Test på motor

På motoren er filtrene testet med en Pegasor Particle Sensor (Se afsnit 4.6) og et "smokemeter" (baseret på en såkaldt sodplet-måling, se afsnit 4.4). Som reference er der benyttet et originalt ubrugt filter fra leverandøren.

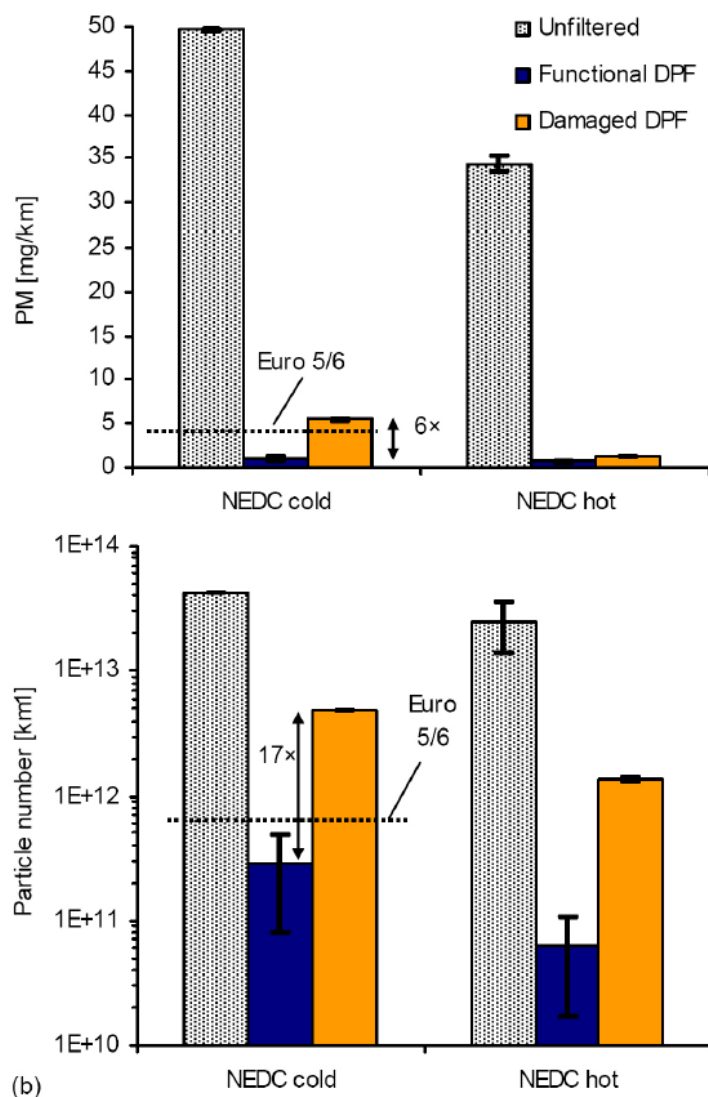


Figur 5 Parallelmålinger af effektivitet med Pegasor Particle sensor (masse effektivitet) (figuren til venstre) og sodpletmåler (smokemeter – reduktion af sværtningsgrad omsat til massekoncentration) (figuren til højre). OEM er et originalt ubrugt filter, de skadede filtre fremgår af figuren og af Figur 4. Fx er det mest skadede filter (two ring off-cracks) også det filter med den laveste effektivitet. X-aksen viser tiden fra sidste regenerering af filteret (afbrænding af filterkagen). Kilde /13/

Af Figur 5 fremgår det tydeligt, at der er forringet effektivitet i de første 10-15 minutter efter regenerering på alle filtre. Det nye ubrugte filter har en betydelig dårligere effektivitet i starten, samt at filteret med de gennemgående revner har en betydelig forringet effektivitet. Det fremgår også at små skader på filtrene er uden den store betydning for filterets effektivitet. Dette skyldes, at små revner ret hurtigt vil "tættes" af sodpartikler (filterkage). Som det fremgår af Figur 5 har det mest skadede filter (med to gennemgående revner) har en effektivitet pænt over 80 % målt som masse. Figur 5 viser endvidere at der er en god sammenhæng mellem PPS måleren der medtager også de små partikler og sodpletmåleren.

Test på køretøj

Køretøjet er testet med et fungerende filter og et skadet filter. Her er der benyttet en CPC (Condensation Particle Counter) efter PMP protokollen (måler partikel antal og masse ned til 23 nm partikler eksklusiv volatile partikler).



Figur 6 Køretøjsemissioner uden fil ter, med et vel fungerende fil ter og med et skadet fil ter (to gennemgående revner - nr. 5 i Figur 4). Den øverste figur er masse målinger, og den nederste er antal småinger. NEDC cold/hot er New European Driving Cycle på kold motor og varm motor. Bemærk at der er en logaritmisk skala på den nederste figur (antal småinger). For nemheds skyld vises resul taterne som effektivitetsprocenter i Tabel 1. Kilde /13/.

| | Masse-reduktion over filter (effektivitet) | | Antals-reduktion over filter (effektivitet) | |
|--------------------------|--|----------|---|----------|
| | NEDC cold | NEDC hot | NEDC cold | NEDC hot |
| Med velfungerende filter | 98 % | 98 % | 99 % | 100 % |
| Med skadet filter | 89 % | 97 % | 89 % | 96 % |

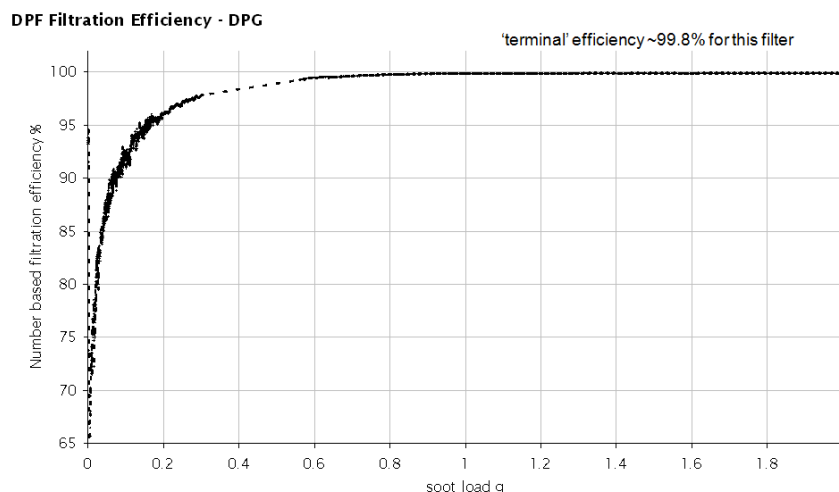
Tabel 1 Effektiviteter med vel fungerende fil ter og med skadet fil ter. Kilde /13/

Målingerne viser, at massereduktionen og antalsreduktionen med et velfungerende filter som forventet er meget stor. Tilsvarende er effektiviteten for et skadet filter lavere.

Ntziachristos et al. /13/ konkluderer følgende:

- Der er en entydig og god sammenhæng mellem Pegasor Particle Sensor (PPS) og sodpletmåleren.
- PPS er tilstrækkeligt velfungerende overfor en korrekt massemåling CPC (efter PMP protokollen) der måler ned til 2,5 nm partikler

Filtereffektivitet over for partikelantal:



Figur 7 Test af filtereffektivitet baseret på antal på et ikke-skadet filter. Målinger er udført med CPC (condensing particle counter) og eksklusiv semi-volatile partikler. Sodbelastningen af filteret skabes vha. en sodgenerator. X-aksen er sodbelastningen på filteret og figuren viser, at efter regenerering af filteret så er effektiviteten lav, men stiger hurtigt til tæt på 100 %. Antalfiltrationseffektiviteten stiger således på samme måde, som masse effektiviteten, se Figur 5. Kilde combustion /16/

3.2.2 Huller i filteret

Seiler /17/ har undersøgt diesel partikelfiltre med henholdsvis 25 % og 100 % af endepropperne fjernet.

| | Skadesgrad | | |
|---------------------------|------------|--------|--------|
| | 0 % | 25 % | 100 % |
| Stationær uden filterkage | 99,973 | 96,945 | 51,152 |
| Stationær med filterkage | 99,999 | 99,550 | 38,913 |
| Kørsel uden filterkage | 99,849 | 89,327 | 36,483 |
| Kørsel med filterkage | 99,999 | 92,503 | 31,917 |

Tabel 2 Masse-effektiviteter af forskellige skadesgrader på diesel partikelfiltre under stationær drift og kørsel henholdsvis med og uden filterkage. Kilde /17/

Tallene viser at et velfungerende filter er nogenlunde uafhængigt af hvor meget filteret belastes under testen. Så snart der er huller i filteret ses der relativt store forskelle mellem stationær tilstand og kørsel. Dermed ser det ud til at et skadet filter har større emissioner (og dermed lavere effektiviteter) når det testes under belastning end hvis det testes ved fri acceleration.

Seiler /17/ nævner endvidere at filtre med huller kan have en "blow-off effekt" ved regenerering, hvor der forekommer partikel slip.

4 Beskrivelse af måleprincipper

4.1 Prøveudtagning og køretøjsbelastning

Der er flere forskellige metoder til prøveudtagning, som enten er baseret på at røggassen fortyndes og afkøles inden prøvetagning eller at man måler direkte i den varme og vandholdige udstødningsgas. Fortynding kan endvidere ske som en integreret del af måleapparatet, som en ekstern enhed, der kobles på måleapparatet eller vha. en fortyndingstunnel (CVS).

Endvidere er bilens belastning under prøvetagningen relevant.

Disse emner beskrives uafhængigt af målemetode i de følgende afsnit

4.1.1 Måling direkte i udstødningsgassen

Målinger direkte i udstødningsgassen kræver et opvarmet instrument, der kan håndtere den varme fugtige gas uden at der sker udkondensering af vand, som enten ville kunne ødelægge instrumentet eller påvirke målingen.

Disse målinger anvendes typisk til efterkontrol, syn og miljøzonekontrol, hvor en fortyndingstunnel ikke er en mulighed.

De fleste måleprincipper til måling direkte i udstødningen har en køling til fx 100°C. I disse tilfælde vil også semi-volatile partikler registreres på måleren (dog er semivolatile partikler formodentlig så små at de ikke registreres på fx en traditionel opacitetsmåler).

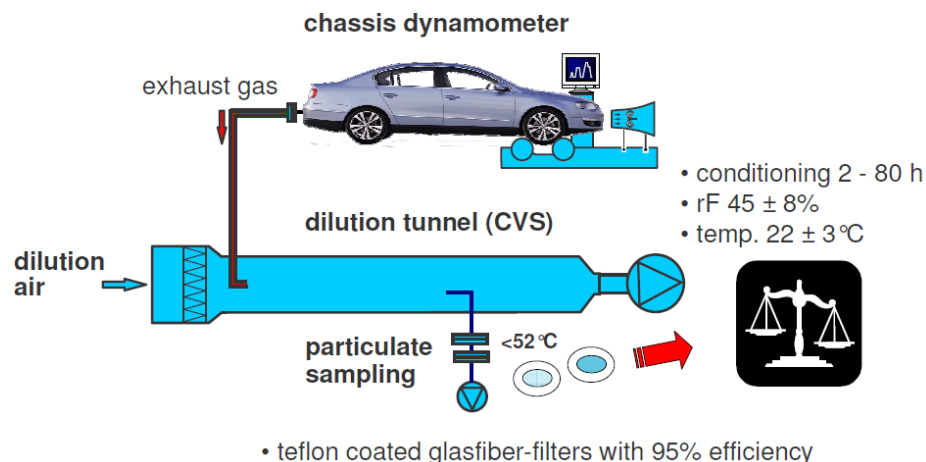
4.1.2 Fortyndingstunnel og chassis dynamometer / prøvebænk

ISO 8178 /18/ angiver at der skal anvende en fortyndingstunnel, hvori røggassen opblandes og fortyndes. Efter opblanding måles partikelindholdet gravimetrisk og isokinetisk i den fortyndede luft. Lufthastigheden i fortyndingstunnelen vil være konstant og (stort set) uafhængig af røggasmængden fra køretøjet. I fortyndingstunnelen betyder fortyndes røggassen endvidere til max. 52°C, og tilstrækkeligt til at der ikke udkondenseres vanddråber fra røggassens vandindhold. Ved fortyndingen kan der dannes sekundære partikler, som måles med ved denne metode.

Producenter af dieslbiler efter Euro V+ og Euro VI må højst emitte et vist antal partikler pr. kørt km (6.0×10^{11}). Antallet af partikler pr. kørt km skal testes i henhold til PMP (Particle Measurement Programme) protokollen /19/. Efter PMP-protokollen undgås sekundære (feks. semi-volatile) partikler ved at udstødningsgassen opvarmes til 350°C i et prøvetagningsystem (thermo-evaporation), hvorefter gassen fortyndes, og re-kondensation undgås. Den principielle testopstilling er vist på tegningen i Figur 8 og Figur 9. Fordelingen af partikler efter filteret efter PMP metoden ses i Figur 3. Det fremgår, at fordelingen er ganske anderledes end i Figur 2, idet toppen af ultrafine, semi-volatile partikler forsvinder. Dette gør antalsmålingen betydeligt mere reproducerbar, idet målingen ellers bliver meget afhængig af det enkelte prøvetagningsudstyrs opbygning og temperatur. For at kunne bruges som

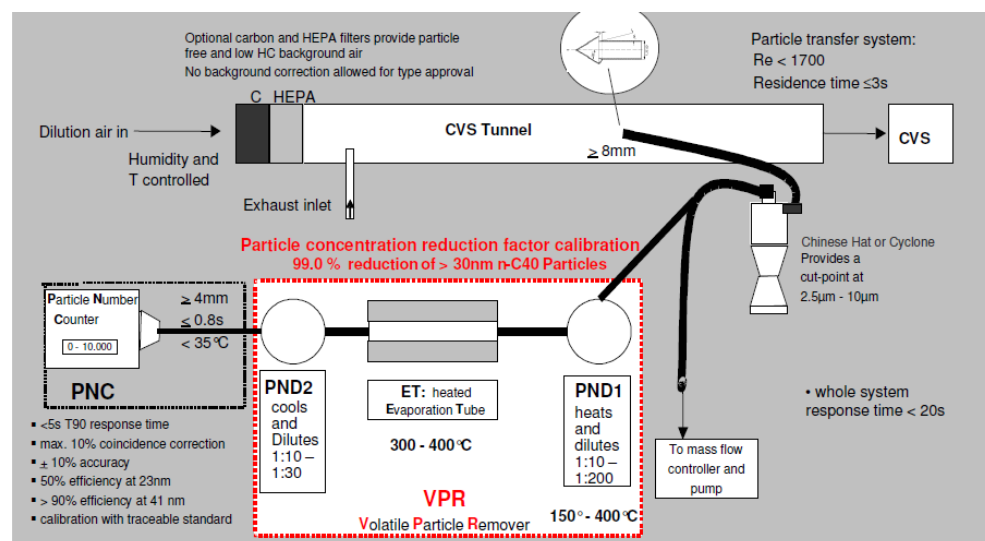
kontrolmetode, er det helt afgørende, at målingen er reproducerbar, og derfor har man valgt denne metode i PMP protokollen.

Ved fremtidige test (Euro Vb) skal fortyndingstunnelen endvidere være forsynet med HEPA filter og der benyttes samme opsamlingsfilter til hele testen. Disse forholdsregler skal sikre at metoden kan måle de meget lave emissioner fra et velfungerende partikelfilter.



• teflon coated glasfiber-filters with 95% efficiency

Figur 8. Når partikelemissionen skal kontrolleres ved typekontrol efter Euro reglerne, udføres målingen på et chassis dynamometer, hvori køretøjets motor kan belastes på samme måde som ved almindelig kørsel. Denne procedure anvendes til bilproducenternes godkendelse af nye køretøjer. Kilde: Kilde: Carli /20/



Figur 9. Måling af antallet af partikler i henhold til PMP protokollen: Semi-volatile partikler fjernes inden målingen. Denne måling udføres i et chassis dynamometer som vist i Figur 8 som en del af køretøjsproducenternes godkendelse af nye køretøjer efter Euro V+ og Euro VI. Kilde: Carli /20/.

4.1.3 Transportable fortyndingsenheder

Mange kontinuert registrerende partikelmålere er udviklet til brug ved stuetemperatur. De kan derfor ikke uden videre bruges til at måle på en ufortyndet røggas, som har en høj temperatur og et højt vandindhold. Hvis man med et af disse instrumenter måler på en ufortyndet udstødningssgas fra en dieselmotor, vil der øjeblikkeligt opstå kondensation af vanddamp i prøvetagningssystemet, og dette vil føre til fejlvisning og i sidste ende til en beskadigelse af instrumentet. Samtidig vil især små partikler diffundere til instrumentets koldere overflader (afsætning som følge af thermoforese),

hvilket medfører risiko for fejlvisning. Man kan forsøge at måle et stykke fra udstødningsrøret og dermed udnytte at udstødningsgassen hurtigt fortyndes, men da fortyndingsgraden i givet fald hverken bliver kendt eller konstant under målingen, er dette ikke en brugbar metode til for eksempel efterkontrol.

Separate fortyndingssystemer kan i princippet benyttes til kontrolmåling for partikelemissioner fra ibrugtagne køretøjer. Sådanne systemer må i sagens natur ikke – som det er gældende for den prototypetest, der gennemføres for at kontrollere Euro normernes kontrolværdier (jf. Figur 8) – fylde et halvt autoværksted. Et eksempel på et transportabelt fortyndingssystem er vist i Figur 10.



Figur 10. Transportabelt fortyndingsudstyr Micro-PSS til måling af partikelemissioner fra dieselmotorer, udviklet af det italienske firma Control System. Kilde: /21/. Micro-PSS er bygget til gravimetrisk bestemmelse i henhold til ISO 16183 /22/, men kan også anvendes til måling med kontinuert registrerende instrumenter såsom CPC. Model len på figuren vejer ca. 39 kg og er transportabel.

4.1.4 Sammenfatning af prøvetagnings metoder

| Prøvetagningsmetode | Beskrivelse | Bemærkning | Anvendelse |
|--|---|---|--|
| Direkte i røggassen | Kræver opvarmede instrumenter, hvor udkondensering af vanddamp kan undgås. | Måler ikke semi-volatile partikler (Sænket temperatur til fx 100°C som i opacitetsmålere inkluderer semi-volatile partikler). | Velegnet til efterkontrol fx periodesyn. |
| ISO 8178 (CVS fortyndingstunnel) | Måler i fortyndet røggas (max.52°C). | Målingen inkluderer i et vist omfang semi-volatile partikler | Velegnet til typegodkendelse og i forbindelse med forskning og udvikling |
| PMP-protokollen (CVS fortyndingstunnel) | Måler i fortyndet og afkølet røggas, men inklusiv et system til fjernelse af semivolatile partikler | Måler ikke semi-volatile partikler. | Velegnet til typegodkendelse og i forbindelse med forskning og udvikling |
| Transportable fortyndingssystemer og integrerede fortyndingssystemer | Udfører en direkte fortynding af røggasen. | Måler semivolatile partikler | Kolde målere (stuetemperatur målere) kan i princippet benyttes sammen med et separat fortyndingssystem |

Tabel 3 Sammenfatning af prøvetagningmetoder.

4.2 Generelt om partikler , opacitet, masse og antal

Opacitet måler lys dæmpningen gennem røgen. Der er en vis korrelation mellem opacitet og masse, som dog er afhængig af partiklernes størrelsesfordeling.

Masse målinger angiver vægten af de emitterede partikler pr m³, pr km eller pr kWh.

Massemålinger kan med nogle målemetoder opdeles i størrelsesklasser, således at vægten i fx mg/m³ for partikelstørrelser mindre end fx 2,5 µm, også kaldet PM 2,5.

Antalsmålinger. Tæller antallet af partikler enten total eller opdelt i størrelsesklasser. Partikelantallet benyttes i stigende grad til at bestemme partikelemissioner fra køretøjer. Dette skyldes, at de ultrafine partikler (der har en aerodynamisk diameter, som er mindre end 100 nm) dominerer partikelantallet, men samtidig har en forsvindende lille masse i forhold til de større partikler. Derfor er det en udbredt opfattelse, at de ultrafine partikler – som i dag betragtes som de mest sundhedsskadelige – ikke kan kvantificeres ved en måling af massen af partiklerne.

4.3 Opacitet

Opacitetsmålere benyttes i mange forskellige sammenhænge til at måle partikelemissioner. De er ganske udbredt på kraftværker og affaldsforbrændingsanlæg, hvor målestrækningen er skorstensdiameteren. De opacitetsmålere der benyttes til dieselpartikelfilter kontrol ved periodesyn /24/, har et opvarmet udtagssystem og en opvarmet målecelle (ca. 100°C).

Gassen og partiklerne passerer gennem målecellen, hvor lyskilden sender en lysstråle gennem gassen til en sensor, der måler hvor meget lys der passerer gennem gasstrømmen. Når der ikke er partikler til stede i målecellen vil 100 % af lyset nå frem til sensoren. Når der er partikler tilstede i målecellen vil partiklerne dæmpe lyset og sensoren vil modtage en mindre lysmængde. Opaciteten (O) er den % af lyset der går tabt (dæmpes af partiklerne). Transmissionen (T) er den %-del af lyset der når frem til sensoren. Kontrolværdien på 0,2 m⁻¹ er en k-værdi eller en lys absorptionskoefficient.

k-værdien defineres ud fra Beer-Lamberts lov:

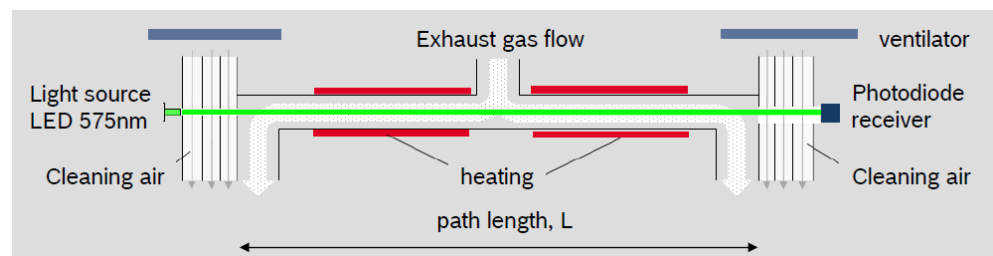
$$k = \frac{-1}{L_A} \times \ln\left(1 - \frac{N}{100}\right), \text{ hvor}$$

$L_A =$ Vejlængden i målecellen [m]

$N =$ Opaciteten, lysdæmpningen eller den del af lyset der ikke når frem

til sensoren [%]

Jo laver k-værdi jo færre partikler.

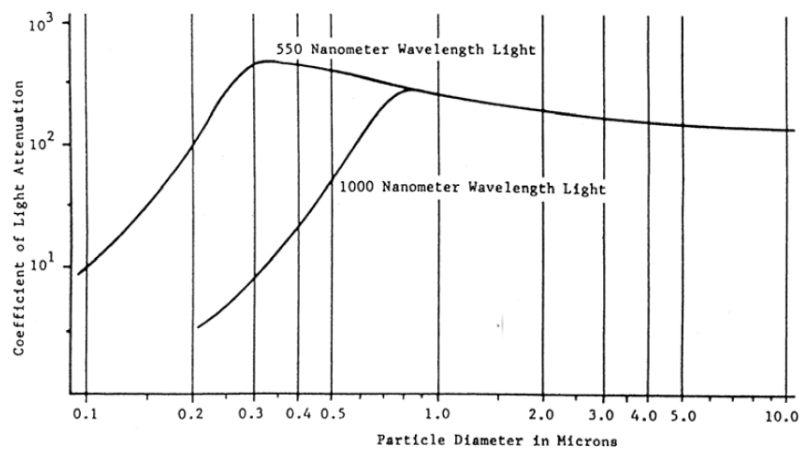


Figur 11 princippet i en opacitetsmåler. Kilde: Bosch /23/.

Vejlængden i målecellen er normalt 430 mm i de anvendte opacitetsmålere til efterkontrol.. En større vejlængde giver relativt flere partikler i målecellen og dermed en større lysdæmpning og en større følsomhed.

Standarden foreskriver en målecelle temperatur på ca. 100°C . Afviges der fra denne temperatur ændres partikkelkoncentrationen i målecellen og k-værdien ændres tilsvarende. Forhøj temperatur giver for lav k-værdi og for lav temp. Giver for høj k-værdi. Mindre afvigelser $\pm 10^\circ\text{C}$ er uden større betydning.

ISO 11614 /24/ foreskriver at bølgelængden for lyskilden skal være mellem 550 nm og 570 nm (grønt lys). Når partiklerne har en diameter, der er mindre end ca. halvdelen af bølgelængden vil lyset begynde at "flette" uden om partiklerne, som dermed detekteres i mindre grad. Når diameteren af partiklerne bliver omkring 1/3-del af bølgelængden dæmper partiklerne kun 16 % af den maksimale dæmpning. Allerede ved partikeldiameter på 1/6-del af bølgelængden registreres mindre end 2 % af den maksimale dæmpning. I praksis betyder det at partikler mindre end ca. 200 nm eller 0,2 μm ikke registreres på en opacitetsmåler.



Figur 12 Sammenhængen mellem bølgelængde og opacitet. Fra SICK Reflektor, særnummer 1994 /25/.

Partikelstørrelsen og især størrelsesfordelingen af partikler i udstødningsgassen her betydning for måleresultatet. Som eksempel tager vi to sfæriske partikler med samme massefylde, men med forskellig størrelse:

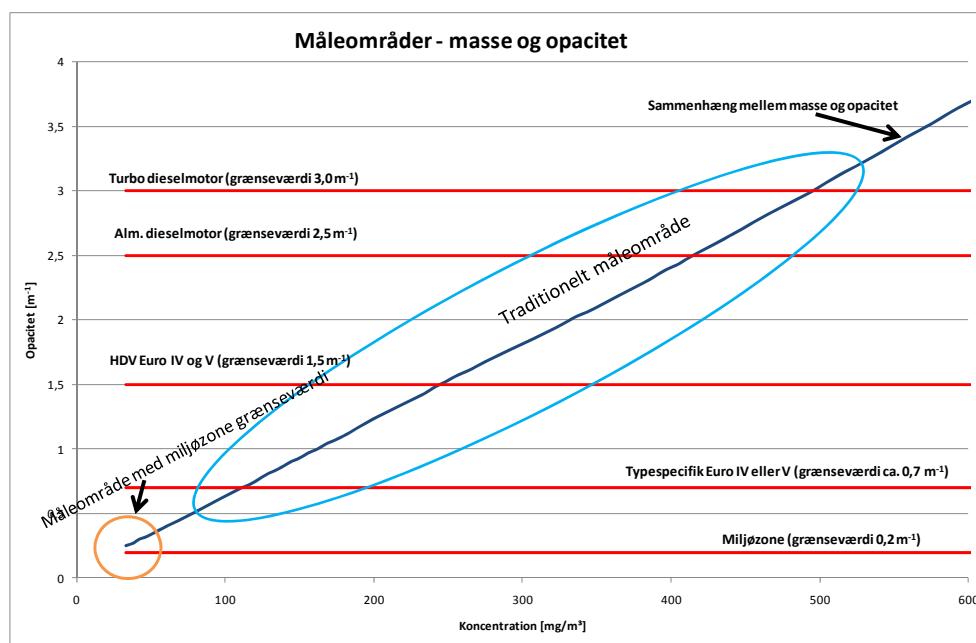
| Diameter | Lysdæmpende areal set fra sensoren | Masse | Forhold mellem masse og areal. M/A |
|----------|------------------------------------|-------|------------------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 4 | 8 | 2 |

Tabel 4 Sammenhæng mellem diameter, areal og masse på en opacitetsmåler.

Den dobbelt så store partikel (målt på diameter) har altså et 4 gange så stort lysdæmpende areal og en masse der er 8 gange større. Hvis vi har to ens partikkelkoncentrationer, hvor alle partiklerne i den ene koncentration er 1 μm og i den anden er 2 μm , så vil måleren vise en k-værdi der er dobbelt så stor for de mindste partikler, selvom massekoncentrationen er den samme. Dette forhold er modsat rettet det forhold at opacitetssignalet har et maksimum ved partikelstørrelser omkring bølgelængden (Figur 12), således at signalet falder med stigende partikelstørrelser. Samlet set kan det altså siges at partikelstørrelsesfordelingen er helt afgørende for opacitetssignalet. En opacitetsmåler der skal give signal i mg/m^3 skal altså kalibreres til præcis den partikelsammensætning den skal benyttes til. Når man ønsker et signal i k-værdi (m^{-1}) som den aktuelle kontrolværdi ved syn er fastsat ved, så skal man blot erkende at signalet er afhængig af partikelsammensætningen i den gas

man måler på, men en kalibrering er ikke relevant. Hertil kommer den omstændighed, at mindre partikler ikke ses på en opacitetsmåler.

Når to partikler passerer målecellen samtidigt kan de skygge for hinanden. Jo større vejlængde og jo flere partikler, jo større vil risikoen være for at denne skyggeeffekt opstår. Når mange partikler skygger for hinanden registreres de ikke fuldt ud på detektoren. Skyggeeffekten er neglignibel ved lave koncentrationer, og dermed ikke relevant ved DPF efterkontrol.



Figur 13 Der er ikke en entydig sammenhæng mellem masse og opacitet og slet ikke i det lave område, hvor miljøzonegrænseværdien gælder. MIRA Report No 1965/10 /7/ indeholder en tabel der viser en sammenhæng mellem k-værdier og mg/m^3 (aftegnet på kurven som den blå linie) Værdierne er målt i 1965 og baseret på pre-Euro partikelstørrelsesfordeling. Når partikelstørrelsesfordelingen ændres vil sammenhængen ændres. Figuren illustrerer endvidere problematikken med sænkede kontrolværdier ganske godt. Tidligere foregik målinger højt oppe i måleområdet (lyseblå ring), hvor de nu er rykket helt ned i omkring det nederste måleområde (orange ring).

Når der er meget få partikler i gasstrømmen skal elektronikken i sensoren skelne mellem 100 % lys og næsten 100 % lys gennem cellen. Når det bliver for svært for sensoren at skelne mellem disse 2 lysmængder har vi nået opacitetsmålerens nedre målegrænse. Hvor denne nedre målegrænse ligger på de nu anvendte opacitetsmålere er uklart, men formodentlig ligger den noget under $0,2 \text{ m}^{-1}$. I VDI 2066 bl. 4 /26/, der omhandler opacitetsmålere til skorstensemissioner er der angivet en nedre målegrænse på 3 % lysdæmpning svarende til en k-værdi på $0,07 \text{ m}^{-1}$ med en vejlængde på 430 mm. Dette tal kan kun være retningsgivende, da skorstensmålere og værkstedsmålere ikke er opbygget ens.

Bosch oplyser at traditionelle opacitetsmålere normalt ikke har fået testet og bevist hvad den nedre målegrænse er, idet der hverken har været krav eller behov for dette. Bosch oplyser endvidere at de mener at kunne måle ned til omkring $0,1 \text{ m}^{-1}$ /23/, men at dette ikke er dokumenteret ved længerevarende og veldokumenterede forsøg. Sådanne test af nedre målegrænse bliver formentlig aldrig udført, da der er nye generationer af målere på vej, med væsentlig lavere nedre målegrænse. Volker Ebert fra PTB /27/ vurderer, at den reelle nedre målegrænse for de traditionelle opacitetsmålere under normal drift på værkstederne ligger mellem $0,1$ og $0,2 \text{ m}^{-1}$. Klaus Burger fra MAHA

/28/ vurderer at den nedre målegrænse ligger så højt som $0,3 \text{ m}^{-1}$, og kommenterer endvidere at det stadig giver mening at udføre synstest med en kontrolværdi på $0,2 \text{ m}^{-1}$, da de meget dårlige filtre under alle omstændigheder vil blive opdaget til syn. Dette understøttes endvidere af Trafikstyrelsens indsamling af data fra periodisk syn af tunge køretøjer/29/, hvor omkring 10 % af tunge køretøjer med eftermonteret dieselpartikelfilter ikke overholder kontrolværdien på $0,2 \text{ m}^{-1}$.

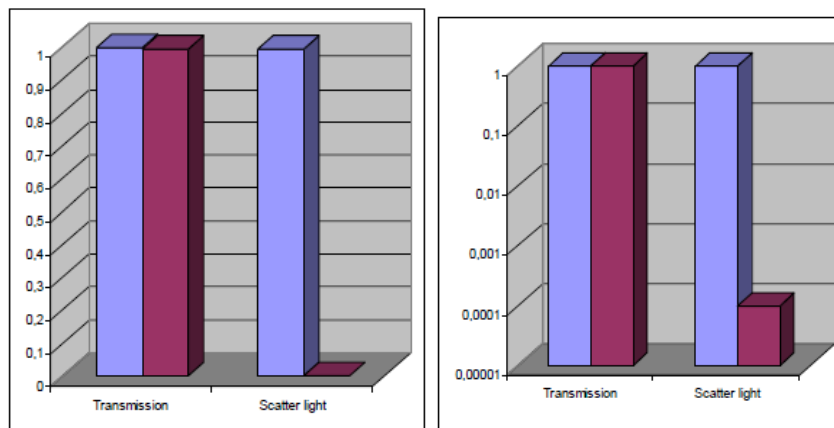
Det kan konkluderes at der er usikkerhed om hvad den reelle nedre målegrænse for traditionelle opacitetsmålere er, hvilket måske kan henføres til forskelle i partikelstørrelsesfordelingen før og efter et partikelfilter.

Der er således tale om 2 forskellige nedre målegrænser:

- Nedre målegrænse for partikelstørrelse (omkring 200 nm i diameter)
 - Mindre partikler kan måles ved at mindske bølgelængden for lyset. ISO 11614 /24/ foreskriver dog en bølgelængde.
- Nedre målegrænse for den målte værdi (det skønnes at den nedre målegrænse i praksis vil ligge mellem $0,1$ og $0,2 \text{ m}^{-1}$, men med en væsentlig forhøjet usikkerhed i dette niveau).
 - Sensorens nedre målegrænse kan sænkes ved at forfine elektronikken eller ved at forlænge vejlængden.

Der findes alternative måleprincipper, med væsentlig lavere nedre målegrænser, baseret på opacitet, som fx back scattering måling (lysspredningsmåling) som beskrevet i afsnit: 4.3.1 til 4.3.3. Ved lysspredningsmåling måles det lys der reflekteres fra partiklerne, hvor den traditionelle metode måler det lys der dæmpes pga. partiklerne.

Årsagen til at lysspredningsmåling kan give væsentlig lavere nedre målegrænse illustreres i følgende eksempel:



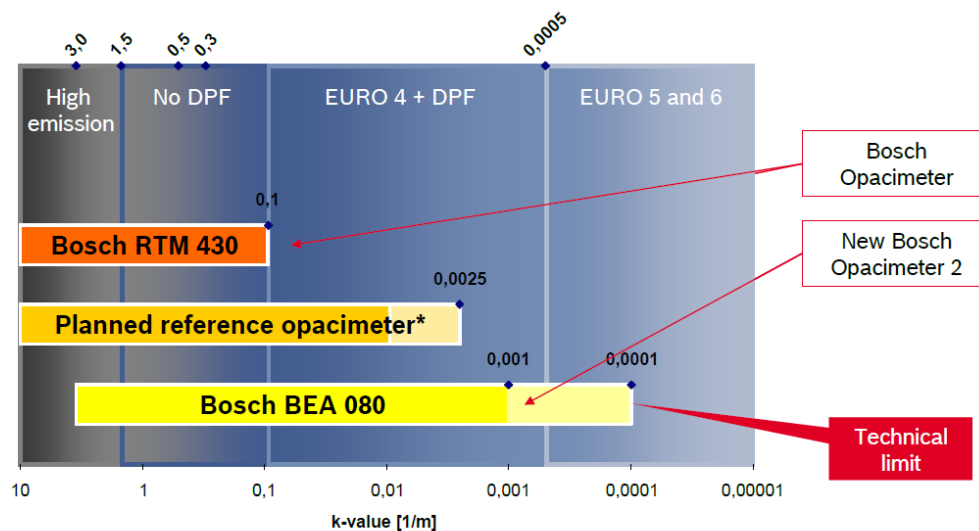
Figur 14 Illustration af årsagen til at lysspredningsteknikken (Scatter light) har en væsentlig lavere nedre målegrænse end den traditionelle opacitetsmåling (Transmission). Figuren til venstre er afbilledet med en alm. skala og figuren til højre med en logaritmisk skala. Ved traditionel opacitetsmåling sammenlignes 2 næsten lige store størrelser, hvor man ved lysspredningsteknikken sammenligner en meget stor størrelse med en meget lille størrelse. I sidstnævnte tilfælde er det muligt at levere væsentlig lavere nedre målegrænser. Kilde: Angelo /30/.

4.3.1 Bosch BEA 080 /31/, opacitet ved lysspredningsmåling

Bosch's nye opacitetsmåler forventes på markedet i 2012 til en pris af ca. 40.000 kr. Sensoren anvender blåt lys med en bølgelængde på 405 nm og kan

angiveligt måle partikler ned til 50-90 nm. Bosch oplyser at instrumentet potentielt kan måle ned til mellem 0,001 og 0,0001 m^{-1} , men at den TÜV godkendte nedre målegrænse formodentlig bliver noget højere (ca. 0,01 m^{-1}):

Comparison of measuring ranges

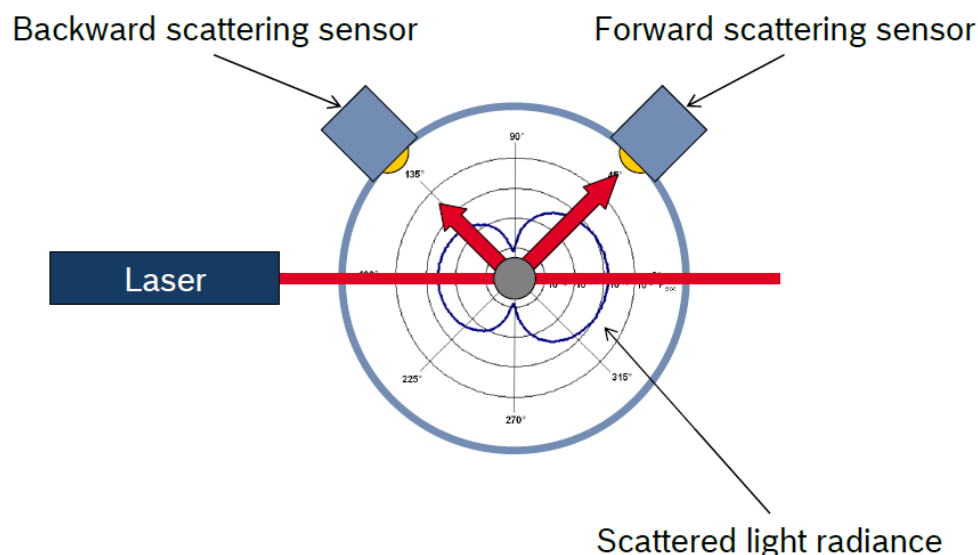


* Valid for Germany

Figur 15 Oversigt over måleområder. Som det fremgår af figuren kan BEA 080 måle langt lavere værdier end kontrolværdien på 0,2 m^{-1} . Kilde: Bosch /23/

Ifølge Bosch bliver denne først frigivet til fri handel i 2012, hvilket skyldes at TÜV/PTB først skal teste denne nye målemetode.

Måleprincippet er scattered light principle (lysspredning måleprincip):

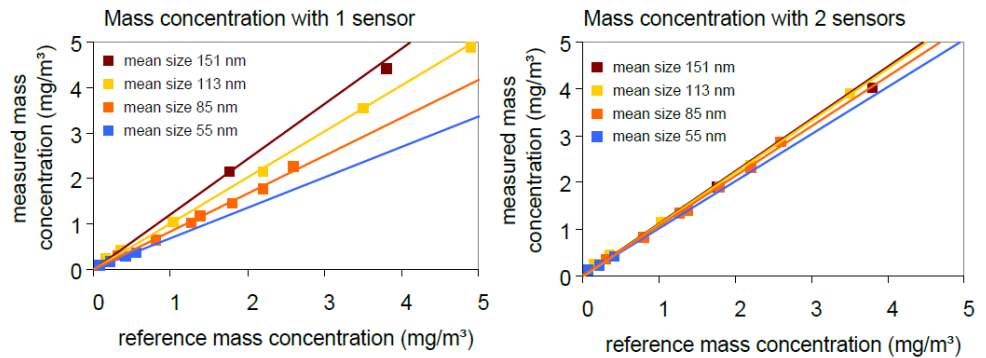


Figur 16 Skitse af måleprincippet i en Bosch BEA 080. Kilde: Bosch /23/

Ved at benytte 2 sensorer opnås der ifølge Bosch en væsentlig forøget præcision (og uafhængighed af størrelsesfordeling):

PM size correction at Bosch BEA 080

→ Using 2 sensors, Bosch BEA 080 increases significantly the accuracy



Figur 17 Ved at anvende 2 sensorer bliver afhængigheden af partikel størrelsesfordelingen mindsket. Kilde: Bosch /23/

Vægt: 6,5 kg.

Estimeret pris: 40.000 kr., afhængig af tilbehør.

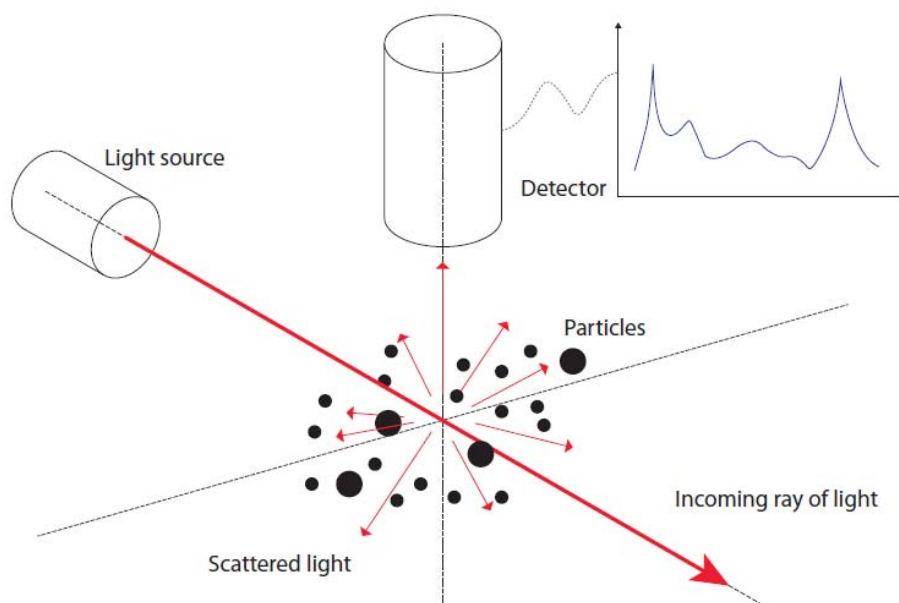
Udviklet til værkstedsbrug.

4.3.2 AVL DiTEST Smoke 2000



Figur 18 AVL 's DiTEST Smoke 2000 2. generation opacimeter forventes på markedet i 2012 . Kilde: AVL /32/

Detektoren anvender lyssprednings teknik med to sensorer:



Figur 19 Måleprincip i AVL's 2. generations opacimeter. Kilde: AVL /32/

Vægt: 5,4 kg.

Bølgelængde: 650 nm.

Nedre målegrænse for partikelestørrelse: 70-90 nm.

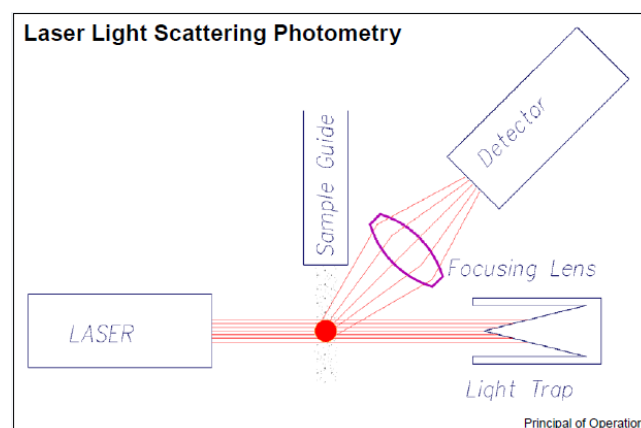
Nedre målegrænse $0,01\text{m}^{-1}$.

Estimeret pris: 40-50.000 kr.

Udviklet til værkstedsbrug.

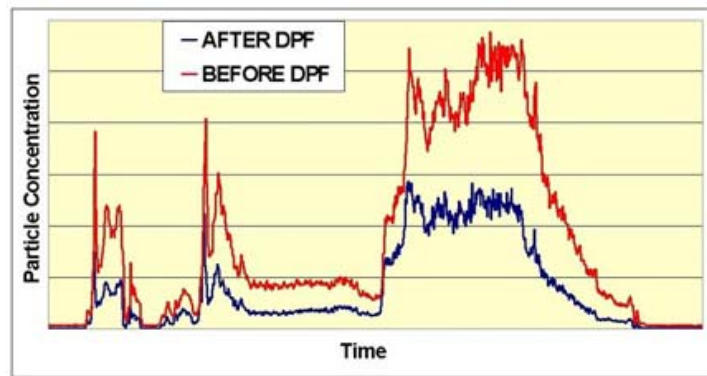
4.3.3 MAHA Laser Light-Scattering Photometry (LLSP). Opazimeter II. Generation MET 6.2 /33/

MAHAs MET 6.2 kommer på markedet i efteråret 2011 til en estimeret pris omkring 40.000 DKK.



Figur 20 Principskitse af måleprincippet i MAHA MET 6.2. Kilde /33/

Dette instrument benytter også lys spredning teknikken. Har angiveligt et måleområde på $0,01 - 700\text{ mg/m}^3$; og en nedre målegrænse på $0,0001\text{ m}^{-1}$ (potentielt nedre målegrænse, Dokumenteret nedre målegrænse bliver formentlig omkring $0,01\text{m}^{-1}$). Kan benyttes til måling direkte i udstødningen. Kan måle partikler ned til ca. 70-90 nm.



Figur 21 Målinger før og efter partikelfilter (DPF) ved kørsel på vej. Begge målinger er udført med MAHA MET 6.2. Kilde: MAHA /33/

Vægt: 5 kg.

Estimeret pris: 40.000 kr, afhængig af tilbehør.

Udviklet til værkstedsbrug.

4.4 Sodplet (smokemeter)

Sodplet metoden er baseret på, at der udsuges en kendt røggasmængde gennem et planfilter, hvorefter filterets sværtning måles. Sværtningen bestemmes fotoelektrisk med en relativ høj følsomhed. AVL angiver for deres instrument AVL 415S Smoke Meter /34/ at det kan måle ned til $0,02 \text{ mg/m}^3$. Sodplet målinger anvendes i Schweiz til miljøzonekontrol; Miljøzonerapport /9/.

AVL415S Smoke Meter:

Vægt: ca. 40 kg.

Nedre målegrænse for partikelestørrelse: Formodentlig ingen.

Nedre målegrænse: $0,02 \text{ mg/m}^3$ (ved ca. 2 minutters prøvetagningstid).

Estimeret pris: Ikke oplyst

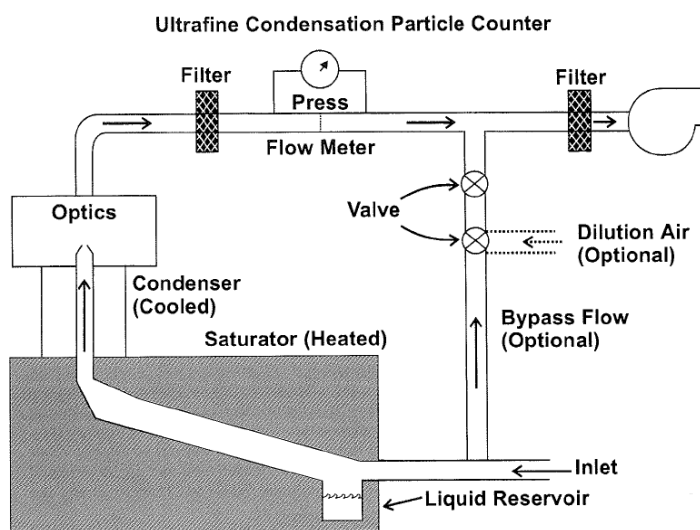
Ikke udviklet til værkstedsbrug. AVL oplyser at udstyret er beregnet til brug i en prøvestand.

4.5 Partikelantal og partikelmasse

4.5.1 TSI's P-TRAK, CPC Condensation Particle Counter

Et hyppigt anvendt måleprincip, som i stigende grad anvendes som referenceprincip til partikelmåling, er CPC (Condensation Particle Counter) princippet. Partiklerne ledes her gennem en zone af mættede alkoholdampe (typisk butanol). Ved en hurtig efterfølgende køling af gassen bliver alkoholdampene overmættede og alkoholen kondenserer på partiklerne. Partikler, der er større end ca. 10 nm vokser typisk til en størrelse på $10 \mu\text{m}$ og kan derfor let bestemmes med en optisk partikeltæller /35/. Denne optiske detektor tæller partiklerne individuelt ved at måle refleksionen (scattering) fra et pulserende lys. Figur 23 viser et eksempel på et håndbåret CPC instrument "P-TRAK" fra det amerikanske firma TSI. En CPC måler kun det samlede partikelantal. P-TRAK kan ikke umiddelbart omregne fra det målte partikelantal til masse (dette vil kræve kendskab til såvel størrelsesfordeling som densiteten af partiklerne). P-TRAK anvendes typisk til måling i arbejdsmiljøet. P-TRAK kan derfor ikke bruges til direkte måling i udstødningen, da den ikke kan tåle den varme og fugtige røggas (TSI angiver på deres hjemmeside en **operating temperature** mellem 0 og 38°C , men det er uklart om denne temperatur område også gælder for varm og fugtig røggas).

Den kræver derfor en forudgående fortynding ved hjælp af fx. et udstyr som vist i Figur 10.



Figur 22. Bestemmelse af partikelantal ved hjælp af CPC (Condensation Particle Counter). Kilde: Baron & Willeke /35/.



Figur 23. Bestemmelse af partikelantal ved hjælp af en håndbåren CPC benævnt P-TRAK fra fa. TSI. Kilde: /36/. Denne CPC anvendes typisk til indeklimate og arbejdsmiljøundersøgelser.

Måleområde: 0-500.000 #/cm³

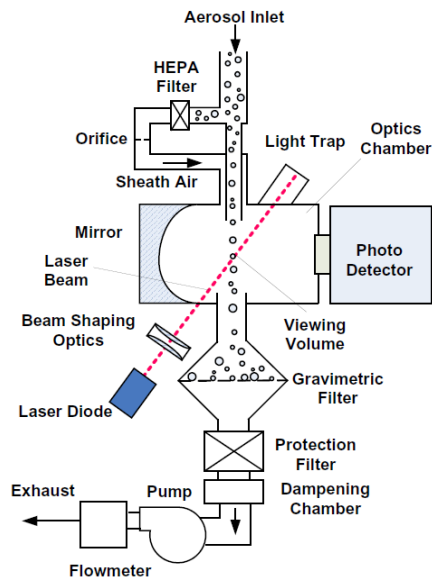
Måleområde partikelstørrelse: 0,02 – 1 µm (20 – 1.000 nm)

Pris: ca. 40.000 kr.

Måleområdet (op til 500.000 #/cm³) vil ved direkte måling i udstødningen formentlig ikke være tilstrækkeligt til at påvise defekter der svarer til kontrolværdien. Måleren vil med andre ord formentlig vise 500.000 #/cm³ allerede ved små defekter af filteret. Hvis den anvendes sammen med en tilstrækkelig fortynding (der sikrer mod kondensation og for tidligt overflow) kan den formentlig godt benyttes til en eller anden form for vejsidekontrol, som leder til indkaldelse til fornyet syn.

4.5.2 TSI's DUSTTRAK, lyssprednings princip

DUSTTRAK benytter light scattering (lyssprednings) princippet, idet partiklerne i gassen belyses af en lyskilde, og det lys, der reflekteres fra partiklerne måles af en lysdetektor, jf. principskisten i Figur 24. DUSTTRAK er egentlig en optisk baseret sensor, der ud fra en antagelse om partiklernes sammensætning og densitet beregner en masse.



Figur 24. Måleprincippet i den optiske måler DUSTTRAK fra TSI til kontinuert måling af partikelmasse. Kilde: TSI /37/. TSI angiver, at DUSTTRAK kan måle partikler i området 0,1 μm – 10 μm , og med en nedre målegrænse på 0,001 mg/m^3 .

DUSTTRAK anvendes typisk til måling i arbejdsmiljøet, og kan derfor ikke bruges til direkte måling i udstødningen, da den ikke kan tåle den varme og fugtige røggas (TSI angiver på deres hjemmeside en **operating temperature** mellem 0 og 50°C, men det er uklart om denne temperatur område også gælder for varm og fugtig røggas). Den kræver derfor en forudgående fortynding ved hjælp af fx. et udstyr som vist i Figur 10. DUSTTRAK skal desuden kalibreres over for den type støv, der aktuelt skal måles på, idet den mængde lys, der reflekteres fra partiklerne vil afhænge af partikelstørrelsesfordelingen, partiklernes refraktive index (dvs. deres evne til at reflektere lys), deres form og partiklernes vægtfylde. Fra fabrikken leveres DUSTTRAK med en kalibreringsfaktor, der er bestemt over for "standard vejstøv" (Arizona Test Dust). Derfor kan DUSTTRAK uden en kalibrering over for den type sod, der aktuelt skal måles på, ikke umiddelbart anvendes til måling af massen af partikler i udstødning fra diesel.

Nedre målegrænse for partikelstørrelse: ca. 100 nm.
Pris: ca. 30.000 kr.

4.5.3 MAHA's MPM 4, lyssprednings princip

MPM 4 anvender lysspredningsteknikken og har følgelig en meget lav detektionsgrænse. Den er udviklet til måling direkte i udstødningen og måler i enheden mg/m^3 . Den kan således ikke umiddelbart benyttes til at eftervise den nuværende kontrolgrænse på 0,2 m^{-1} . MAHA har som tidligere nævnt udviklet en lysspredningsmåler, der bliver godkendt til måling i enheden m^{-1} , se afsnit 4.3.3.



Figur 25 MAHA's MPM 4. Kil de: MAHA /38/

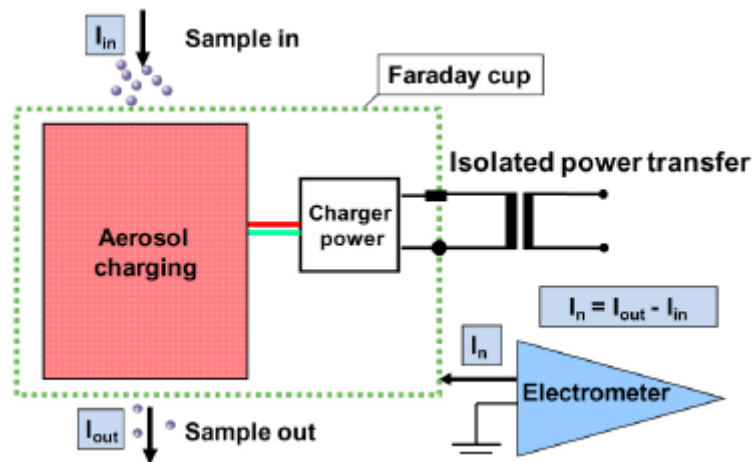
Måleområde: 0,01-700 mg/m³

Måleområde partikelstørrelse: ikke oplyst, men formentlig fra 70-100 nm og opefter.

Vægt: 5 kg

Pris: 75-90.000 kr.

4.6 Pegasor particle sensor /39/



Figur 26 Princippet i PPS. Partiklerne lades med en ladning, der er proportional med partiklernes overfladeareal. Når partiklerne passerer ud af sensoren (faraday cup) måles den ladning, der forsvinder. Kilde: Ntziachristos /13/.

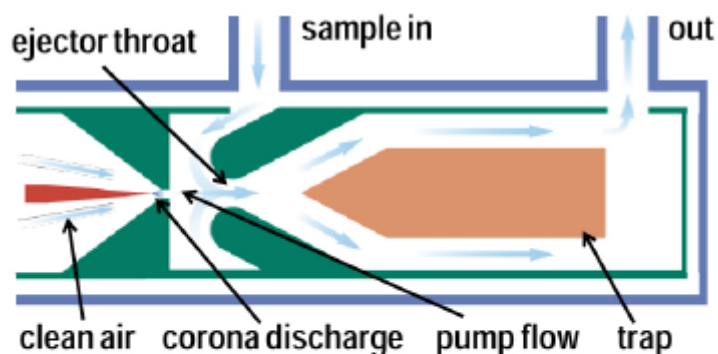


Figure 2. Sensor schematic. The air jet ionized in the corona discharge functions as a pump flow of an ejector. The ejector draws the sample flow, and the particles are charged prior to the ion trap. The inner part of sensor is electrically isolated, and the current measured from it equals the charging rate of particles exiting with the outlet flow.

Figur 27 Opbygning af sensoren – principskitse. Kilde: Ntziachristos /13/.

Målersignal er proportionalt med partikel overflade areal koncentration. Målesignalet kan via diverse algoritmer og kalibreringer konverteres til antal koncentration og masse koncentration med en god tilnærmelse /13/.

PPS er testet af Ntziachristos /13/ og fundet velegnet til måling af massekoncentration og antalskoncentration på tunge køretøjer med partikelfilter (se endvidere afsnit 3.2.1).

Nedre målegrænse for partikel størrelse: ca. 2 nm.
 Nedre målegrænse for masse: 0,003 mg/m³
 Nedre målegrænse for antal: 1.000#/cm³ eller 1E⁹#/m³

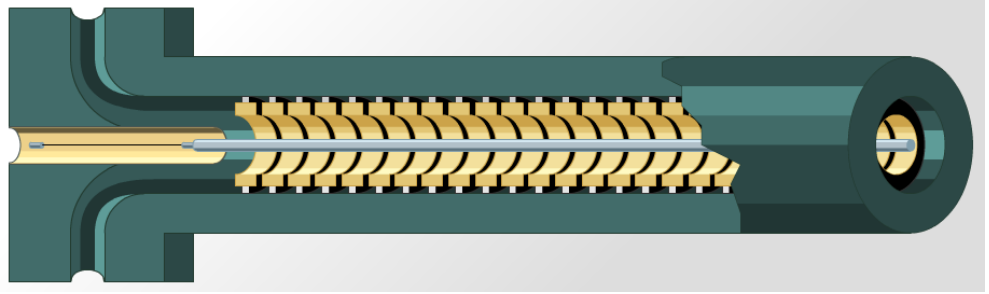
Sensoren er udviklet til videnskabelige formål, men kan leveres som en enhed der i princippet kan betjenes af trænet personale i et værksted. Der er dog renseprocedurer og et krav til meget ren og tør trykluft, der betyder at instrumentet pt. ikke er klar til værkstedets brug.

Estimeret pris for en enhed inklusiv opvarmet prøvetagningsudstyr og trykluftrensingsudstyr men eksklusiv PC: 190.000.

4.7 Combustion Differential Mobility spectrometer DMS 500 og DMS 50

Combustion Differential Mobility spectrometer DMS 500 og DMS 50 kan måle både antals koncentration og masse koncentration. Partikelstørrelser fra 5 nm til 2,5 µm (DMS 50 fra 5 nm til 560 nm) /40/.

Princip: partiklerne lades med en ladning der er proportional med overfladearealet. Partiklerne passerer gennem en elektrode og en serie detektorer. Da små partikler har højere mobilitet rammer de mindste partikler de første detektorer og de største rammer de sidste detektorer. Mængden af partikler der rammer en detektor kan måles ud fra ladningen. Med 22 detektorer kan partiklerne opdeles i 22 størrelsesklasser, og resultater i både masse og antal kan beregnes.



Figur 28 principskitse af DMS. Kilde Cambustion /40 /

DMS 500 er et forskningsinstrument og ikke velegnet til efterkontrol pga. pris størrelse, håndtering mv.



Figur 29 Bil lende af DMS 50. Kilde Cambustion /40/.

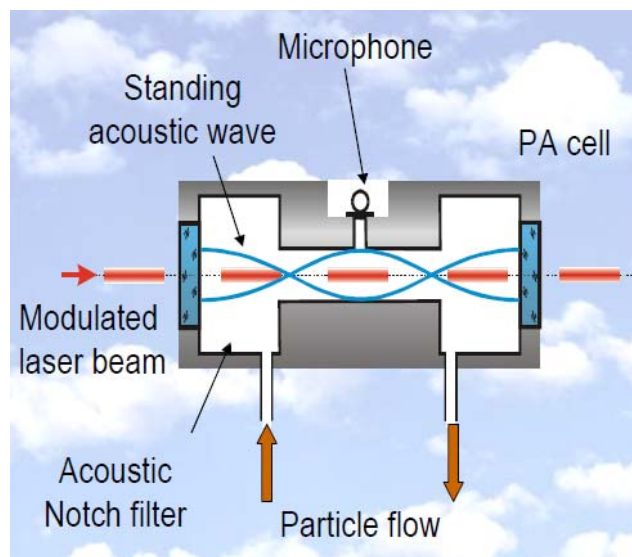
DMS 50 er udviklet til bla. mobile test og målinger på kørende køretøjer med integreret fortyndingssystem. Kan også anvendes i fortyndingstunnel uden fortyndingssystemet indbygget. Kan håndteres af synshalspersonale, men det kræver uddannelse og træning. Endvidere er der en månedlig rensningsprocedure, som bør håndteres af eksperter.

Nedre målegrænse for masse koncentration er ca. $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cambustion oplyser at at en DMS 50 inklusiv fortyndingssystem vil koste ca. 675.000 kr. Uden fortynding koster det ca. 450.000 kr.

4.8 AVL Micro Soot Sensor

AVL Micro Soot Sensor måler i fortyndet røggas (kan ikke tåle temperatur og fugt) men leveres med fortyndingsenhed. Måleprincippet er photoakustik: Et pulserende lys sendes ind i detektoren, hvor sodpartiklerne opvarmes og udvides og derfor skaber en lydbølge, som registreres på en mikrofon. Nedre målegrænse (i fortyndet gas) på ca. $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ /41/.



Figur 30 Princippet i AVL micro Soot Sensor. Kilde: AVL /34/

Vægt: ca. 20 kg. + 12 kg for fortyndingsenhed.

Nedre målegrænse for partikelestørrelse: I princippet ingen.

Nedre målegrænse 0,005 mg/m³.

Estimeret pris: ikke oplyst.

Ikke udviklet til værkstedsbrug. AVL oplyser at instrumentet er udviklet til brug i en prøvestand.

4.9 Manuel le metoder

4.9.1 Manual gravimetrisk måling

De gravimetriske målemetoder er karakteriseret ved at der udtages en prøve ved at suge en kendt mængde røggas gennem et planfilter. Mængden af partikler opsamlet på filteret bestemmes ved differensvejning, som kombineret med den udsugede luftmængde gennem filteret kan omregnes til enheden masse/volumen (mg/m³).

Gravimetrisk måling benyttes altid i forbindelse med fortynding af røggassen. Afsnit 4.1 beskriver betydningen af fortynding af gassen inden måling.

Gravimetrisk måling er begrænset af, at prøvetagningen tager noget tid, og at resultatet er en middelværdi over prøvetagningsperioden. Filteret skal konditioneres og vejes før og efter prøvetagning, dvs. der er ikke mulighed for at have her og nu resultater. Den gravimetriske metode er dermed ikke velegnet til perodesyn og miljøzone kontrol.

4.9.2 Visuel inspektion

Det er almindeligt kendt at der ikke forekommer sværtning af udstødningsrøret efter et velfungerende partikelfilter. På Figur 31 ses en tydelig sværtning af udstødningsrøret.



Figur 31 Det er almindeligt kendt at udstødningsrøret fra et vel fungerende diesel partikel filter ikke er sværtet.. Kilde MAHA /42/.

Det er ikke muligt at sige, at et sværtet udstødningsrør er udtryk for at filteret er skadet i sådan en grad at det overskrider kontrolværdien.

I følgende situationer kan det tænkes at udstødningsrøret er sværtet uden at det nødvendigvis betyder at kontrolværdien er overskredet.:

- Filteret er skiftet uden at udstødningsrøret er rensat
- Filteret har en mindre skade – det er umuligt at sige om en mindre skade (under kontrolværdien) giver sværtning
- Umiddelbart efter en regenerering har filteret nedsat effektivitet, som muligvis sætter sig som en sværtning, men formentlig også forsvinder ved normal drift

Omvendt kan et skadet filter der overskrider kontrolværdien fremstå som rent i følgende situationer:

- Udstødningsrøret renses umiddelbart inden kontrol
- Filteret overskrider kontrolværdien en lille smule, men det giver ikke anledning til betydelig sværtning

Metoden kan kun benyttes som en indikation af, at der muligvis er noget galt med filteret, hvilket muligvis kan benyttes ved uanmeldt stikprøvekontrol, som medfører at køretøjet indkaldes til en ekstra kontrol.

4.10 Lidt om OBD (ON-Board Diagnostics)

OBD er betegnelsen for målesystemer der er fastmonteret i køretøjet, og som giver advarsler og signal til bilens elektroniske system.

På nyere dieselmotorer med filter er der fra fabrikkens side monteret et OBD system, der måler trykfaldet over filteret og giver advarsel, hvis trykfaldet er for lavt (filteret er skadet eller utæt). Tyske undersøgelser dokumenterer dog at disse systemer ikke er i stand til at opdage defekte filtre sammenholdt med nyeste og kommende kontrolværdier. Kilde Multari /42/

Som nævnt i afsnit 3.2 er Pegasor Particle Sensor (PPS) testet til OBD formål i en græsk undersøgelse /13/. Denne undersøgelse konkluderer at PPS vil være velegnet til OBD formål overfor fremtidige kontrolværdier. Med den nuværende pris virker dette dog ikke sandsynligt, men hvis markedet er stort nok kan det forventes at prisen falder.

4.11 Oversigt udvalgte målemetoder til partikelmasse og partikelantal

| Instrument | Antal/masse/ opacitet. | Fortynding / direkte måling i røggas | Nedre måle- grænse partikel- størrelse [nm] | Det. gr. k-værdi [m^{-1}]eller masse konc. [mg/m^3] | Pris [DKK] | Vægt [kg] | Vurdering af teknisk (og økonomisk) anvendelighed til efterkontrol 1:Ikke egnet 2: Muligvis egnet 3: Egnet |
|---|---------------------------|---|--|---|------------|---------------|--|
| Traditionel opacitetsmåler, Bosch , MAHA, AVL m.fl. | Opacitet Se afsnit 4.3 | Direkte | 200 nm | 0,1-0,2 | 40.000 | Transportabel | 2-3 (ved $0,2 \text{ m}^{-1}$) 1 (ved $<0,2 \text{ m}^{-1}$) |
| Bosch BEA 080 | Opacitet | Direkte | 50-90nm | $0,01 \text{ m}^{-1}$ | Ca. 40.000 | 6,5 kg | 3 |
| AVL DiTEST Smoke 2000 | Opacitet | Direkte | 70-90 nm | $0,01 \text{ m}^{-1}$ | Ca. 40.000 | 5,4 kg | 3 |
| MAHA MET 6.2 | Opacitet og masse | Direkte | 70-90 nm | $0,01 \text{ m}^{-1}$ | Ca. 40.000 | 5 kg | 3 |
| AVL 415S Smoke Meter | Sodplet og masse | Direkte | Formentlig ubegrænset | $0,02 \text{ mg}/\text{m}^3$ | ? | 40 kg | 2-3 (benyttes i Schweiz) |
| TSI P-TRAK, CPC | Antal og masse | Fortynding | 20 nm | ? | Ca. 40.000 | Håndholdt | 1 |

| Instrument | Antal/masse/ opacitet. | Fortynding / direkte måling i røggas | Nedre måle- grænse partikel- størrelse [nm] | Det. gr. k-værdi [m^{-1}]eller masse konc. [mg/m^3] | Pris [DKK] | Vægt [kg] | Vurdering af teknisk (og økonomisk) anvendelighed til efterkontrol 1:Ikke egnet 2: Muligvis egnet 3: Egnet |
|---|---|--|--|---|------------|--|--|
| TSI DUST - TRAK, lys spredning | Masse (kan muligvis måle opacitet) | Fortynding | 100 nm | 0,001 mg/m^3 | Ca. 30.000 | Håndholdt | 1 |
| MAHA MPM 4 | Masse | Direkte | Formentlig fra 70-100 nm | 0,01 mg/m^3 | 75-90.000 | 5 kg | 2-3 (måler i forkert enhed) |
| Pegasor Particle Sensor PPS, Escaping current principle | Antal og masse | Direkte | 2 nm | 0,003 mg/m^3 | 190.000 | 2,6 kg for sensoren alene. Samlet noget mere. | 1-2 |
| Cambustion DMS 50 | Antal og masse | Direkte (med integreret fortyndings- system) | 5 nm | 0,002 mg/m^3 (efter fortynding) | 675.000 | Transportabel | 1 |

| Instrument | Antal/masse/ opacitet. | Fortynding / direkte måling i røggas | Nedre måle- grænse partikel- størrelse [nm] | Det. gr. k-værdi [m^{-1}]eller masse konc. [mg/m^3] | Pris [DKK] | Vægt [kg] | Vurdering af teknisk (og økonomisk) anvendelighed til efterkontrol 1:Ikke egnet 2: Muligvis egnet 3: Egnet |
|--|---------------------------|---|--|---|------------|-----------|--|
| AVL Micro Soot Sensor, Photoakkustik | Masse | Direkte (med integreret fortyndingss ystem) | ? | 0,005 mg/m^3 (efter fortynding) | ? | 32 kg | 2 |

5 Vurdering af den nuværende kontrolmetodes egnethed, herunder alternative metoder

5.1 Traditionelle metoder

De traditionelle opacitetsmålere, der i dag anvendes til efterkontrol, skal kunne kontrollere en kontrolværdi på $0,2 \text{ m}^{-1}$ i forbindelse med miljøzonekontrollen.

Det er usikkert hvad den reelle nedre målegrænse for de traditionelle opacitetsmålere er. Den nedre målegrænse ligger på samme niveau som kontrolværdien, og muligvis endda lidt højere. Dette betyder, at målinger i niveauet omkring kontrolværdien er usikre, men at man godt kan måle væsentlige overskridelser af kontrolværdien. Det er endvidere god måleteknisk praksis at sikre at man bør have en nedre målegrænse der er noget lavere en kontrolværdien, da det er velkendt at usikkerheden på målinger generelt er høj omkring den nedre målegrænse.

Vi er således i en situation, hvor de traditionelle målemetoder kan måle ned til omkring kontrolværdien, men ikke længere ned, og med en betydelig usikkerhed. I praksis betyder det, at der kan være køretøjer der godkendes selvom de har en emission der ligger lidt over kontrolværdien. Samtidig kan det med sikkerhed siges at de køretøjer der overskrider kontrolværdien uden tvivl har et skadet filter.

Samlet set betyder det, at ingen vognmænd tvinges til at skifte filter på køretøjer der overholder kontrolværdien, men at der er en vis risiko for at køretøjer med en overskridelse får tilladelse til at køre i miljøzonen. Meget skadede filtre vil stadig opdages ved syn.

Såfremt man ønsker at sænke kontrolværdien eller evt. regulere for emissionen af ultrafine partikler er der behov for alternative måleprincipper.

Ved fastholdelse af den nuværende kontrolværdi bør det overvejes om de nye lyssprednings målemetoder, som har væsentlig lavere nedre målegrænser skal tages i anvendelse når de bliver tilgængelige på markedet, pga. af den lavere nedre målegrænse og dermed sikrere eftervisning af kontrolværdien.

Det bør endvidere overvejes at differentiere kontrolværdien ved syn afhængig af Euro-niveau på den pågældende motor, således at den kommer i bedre overensstemmelse med principgodkendelsens krav om 80 % reduktion. En differentieret (lavere) kontrolværdi kræver også et skift af måleprincip.

De opacitetsmålere, der anvendes til miljøzonekontrol i dag, baseres på en måleteknik, der har været uændret i mange år. Den nedre målegrænse for partikelstørrelse for disse traditionelt anvendte opacitetsmålere ligger omkring 200 nm. Det vil i praksis sige, at partikler mindre end disse størrelser ikke måles. For den nye "anden generations" opacitetsmålere, der baseres på lyssprednings teknikken, kan partikelstørrelser ned til omkring 50-70 nm

måles. Disse nye opacitetsmålere forventes introduceret på markedet i løbet af 2012. En opacitetsmåling er som udgangspunkt udviklet med det formål at kontrollere udslippet i forhold til partiklernes masse. Partikler, der er mindre end 200 nm har en forsvindende lille masse, og med de nuværende opacitetsmålere er de uden betydning – dette gælder også i forhold til kontrolværdien på $0,2 \text{ m}^{-1}$ gældende for miljøzoner. Det er muligt, at en kombination af de nye opacitetsmålere (lys sprednings teknik) og en lavere kontrolværdi vil kunne sikre en reduktion i både de store og de små partikler. Hvilken kontrolværdi der skal til, og om det stemmer overens med den praktiske virkelighed kan ikke afgøres i dette projekt.

En tysk rapport "Emission 2010" er under udarbejdelse og forventes færdig i efteråret 2011. Denne rapport indeholder resultatet af en række tests udført af TÜV i samarbejde med ASA (Automobil-Service Ausrüstungen) og instrumentproducenter. En ny kontrolværdi for efterkontrol på Euro V+ og Euro VI køretøjer drøftes i den forbindelse. Emission 2010 udføres bl.a. som et led i projektet TEDDIE (EU Low Diesel Emissions Project)/43/, der bl.a. har til formål at undersøge mulighederne for ny måleteknologi ved syn i forbindelse med de skærpede Euro krav til både tunge og lette dieselmotorer.

Et evt. skift til nye måleprincipper bør afvente resultatet af TEDDIE undersøgelsen, der forventes afsluttet i 2011.

5.2 Lysspredningsteknikken

Den nedre målegrænse kan sænkes ved at anvende alternative måleprincipper, der opfylder kravene til målemetoder til efterkontrol – dvs. relativ lav pris, stor robusthed, driftsikkerhed, og enkel betjening. De mest relevante alternativer vurderes at være baseret på laser back scattering eller lysspredningsteknik som beskrevet i afsnit: 4.3.1 til 4.3.3. Bosch, MAHA og AVL forventer fra 2012 at sælge denne nye type "opacitetsmålere", der er udviklet til efterkontrol på dieselmotorer med partikelfiltre. Disse instrumenter har den fordel, at de omregner den målte koncentration af partikler til k-værdi i enheden m^{-1} , og de vurderes derfor at kunne imødekomme de generelle krav i EU om, at kontrolværdierne for efterkontrol af partikelemissioner fra dieselmotorer skal måles i enheden m^{-1} . Den potentielle nedre målegrænse forventes at være helt ned til $0,001 \text{ m}^{-1}$, hvorimod den dokumenterede nedre målegrænse formentlig bliver $0,01 \text{ m}^{-1}$. Under alle omstændigheder gør dette metoden velegnet til dette formål. Begge instrumenter har også forbedret følsomhed overfor partikelstørrelse. Prisen forventes at ligge i området mellem 40.000 og 50.000 DKK.

5.3 Andre alternative måleprincipper

Rapporten gennemgår en række andre måleprincipper, der kan måle partikeludslippet i lave koncentrationer. De fleste af disse målere er væsentligt dyrere end de oven for nævnte opacitetsmålere, og da de enten er udviklet til brug ved typegodkendelse eller til forskning og udvikling, stiller de ganske store krav til det tekniske personale, der skal betjene udstyret.

Tre metoder har været i debatten været anvendt til vurdering af filtereffektivitet:

- P-TRAK fra TSI (se kap. 4.5.1).

- Kan kun benyttes til direkte måling i udstødningen i kombination med fortyndingsudstyr
- Har et begrænset måleområde og vil ved måling direkte i udstødningen formentlig give overflow allerede ved små defekter af filteret: kan altså ikke benyttes til at påvise defekte filtre
- Måler det samlede partikelantal, men kan omregnes til masse hvis partikelstørrelsesfordeling og densitet er kendt (en kalibrering)
- Vurderes ikke velegnet til efterkontrol ved syn.
- Kan ikke benyttes til at kontrollere en kontrolværdi i m^{-1}
- I kombination med et transportabelt fortyndingsudstyr der sikrer mod kondensation og for tidligt "overflow" kan P-TRAK potentielt anvendes ved fx vejsidekontrol med efterfølgende indkaldelse til ekstra synskontrol.
- DUST-TRAK fra TSI (se kap. 4.5.2)
 - Kan kun benyttes til direkte måling i udstødningen i kombination med fortyndingsudstyr
 - Måler den samlede masse ud fra en antagelse om partiklernes sammensætning og densitet. Måleren skal altså kalibreres til den emission den skal måle på
 - Leveres fra fabrikken med en kalibrering over for "standard vejstøv", hvilket ligger meget langt fra sodpartikler. Kan dog kalibreres til sod.
 - Vurderes ikke velegnet til efterkontrol ved syn
 - Kan ikke benyttes til at kontrollere en kontrolværdi i m^{-1}
- MPM 4 fra MAHA (se kap. 4.5.3)
 - Kan benyttes til direkte måling i udstødningen
 - Er udviklet til måling af dieselpartikler i lavt niveau i enheden mg/m^3 (masse)
 - Kan benyttes til vejsidekontrol.
 - Kan ikke benyttes til at kontrollere en kontrolværdi i m^{-1}

6 Konklusion

Euro normer, kontrolværdier og dieselpartikelfiltre

- Principgodkendelsen (der ligger til grund for tilladelsen til at køre i miljøzonen) stiller krav om en 80 % reduktion uanset grundbelastning (dvs. Euro I, II eller III før filter). Kontrolværdien ved periodisk syn er en fast værdi, og er således udelukkende en kontrol af et emissionsniveau.
- Kontrolværdien ved syn er baseret på en 80 % reduktion af massen fra en Euro I motor. De fleste tunge køretøjer med eftermonterede filtre har Euro III motorer. Euro IV har automatisk lov til at køre ind i miljøzonerne, men de kontrolleres dog ved den periodiske kontrol. Udviklingen i motorer betyder, at den emission der passerer gennem et 80 % effektivitet filter på en Euro I motor kan være væsentlig højere end den emission der passerer gennem et tilsvarende effektivt filter monteret på en nyere motor. Moderne motorer med et meget skadet filter eller uden filter vil kunne overholde kontrolværdien ved syn på $0,2 \text{ m}^{-1}$ (ca. 24 % af Euro III køretøjer uden filter er under $0,2 \text{ m}^{-1}$ ved syn /29/). Generelt vil moderne motorer med et velfungerende filter ligge meget langt under kontrolværdien. Det kan således ikke ved periodisk syn påvises om filteret på en nyere motor har 80 % reduktion, men udelukkende om niveauet er under eller over kontrolværdien på $0,2 \text{ m}^{-1}$.

Målemetoder

- Metoder til efterkontrol skal kunne eftervise et emissionsniveau på $0,2 \text{ m}^{-1}$. Når køretøjer typegodkendes eller testes i en prøvestand mv. benyttes mere præcise målemetoder og der opereres med kontrolværdier i g/kWh. Da gasmengden varierer med belastningen af motoren vil metoder der måler koncentration (opacitet (m^{-1}), masse (mg/m^3) eller antal ($\#/ \text{m}^3$)) ikke kunne sammenlignes med værdier i g/kWh. . Det er dog et krav, at kontrolmetoden skal give reproducerbare resultater. I praksis er kontrolmetoden en kontrol af et emissionsniveau ikke en kontrol af om filteret virker.
- De traditionelle målemetoder kan måle ned til omkring kontrolværdien, men ikke længere ned, og med en betydelig usikkerhed. I praksis betyder det, at der kan være køretøjer der godkendes selvom de har en emission der ligger lidt over kontrolværdien. Samtidig kan det med sikkerhed siges at de køretøjer der overskrider kontrolværdien uden tvivl har et skadet filter.
- Samlet set betyder det, at ingen vognmænd tvinges til at skifte filter på køretøjer der overholder kontrolværdien, men at der er en vis risiko for at køretøjer med en overskridelse får tilladelse til at køre i miljøzonen. Meget skadede filtre vil stadig opdages ved syn.
- Der er alternative metoder på vej, som vil være væsentlig bedre i stand til at kontrollere både den nuværende kontrolværdi og evt. skærpede kontrolværdier i enheden m^{-1} .

- Der er en lang række alternative målemetoder og principper. Fælles for de fleste af disse er, at de er beregnet til andre formål end efterkontrol i en synshal. De kan hver for sig være yderst velegnet til deres formål, men vil være vanskelige at benytte til efterkontrol, enten pga. pris, krav om uddannet personale, rengøring, anvendt måleenhed etc.
- Metoder der måler antal og metoder der måler masse kan ikke sammenlignes uden detaljeret kendskab til partiklernes sammensætning og densitet.
- DUST-TRAK og P-TRAK kan ikke anvendes til at måle direkte i udstødningen. De er begge udmærkede målemetoder, men med et andet formål end udstødningsmålinger. Instrumenterne kan ikke tåle vanddamp og høj temperatur og kræver derfor en fortynding af udstødningsgassen. Dette kan opnås ved at placere måleren lidt væk fra udstødningen, men det er umuligt at sige hvor meget røggassen bliver fortyndet ved denne metode. Fremgangsmåden kan kun i bedste fald give en indikation af niveauet i udstødningen og vil derfor ikke være velegnet til kontrolmåling ved syn. P-TRAK har i øvrigt en øvre målegrænse der muligvis nås allerede før kontrolværdien overskrides.

Skadede filtre

- En undersøgelse viser at selv et filter med to gennemgående revner har en meget høj effektivitet over 89 % masse reduktion.
- En undersøgelse angiver at et filter med 100 % af endepropperne fjernet (svarende til et filter, hvor gassen kan passere igennem uden at skulle trænge igennem filtermaterialet) har en effektivitet på 32 til 36 % ved kørsel. Variationen skyldes at mængden af sodpartikler opsamlet på filteret har en positiv effekt på effektiviteten. Samme undersøgelse påpeger at filtre med huller kan have en "blow-off effekt" ved regenerering, hvilket vil sige at en del af de opsamlede partikler ikke brændes af ved regenerering men emitteres i stedet (men nu formentlig med en mere ufarlig partikelstørrelsesfordeling).

Fremtidig kontrol

- Indtil videre anbefales det at fastholde det nuværende kontrolsystem, som opdager meget skadede filtre og dermed sikrer et generelt lavt niveau. Det bør overvejes at skifte til lysspredningsteknikken, når den er tilgængelig kommercielt.
- En mulighed for at skærpe kontrollen og dermed udslippet af dieselpartikler i byerne er en lavere kontrolværdi kombineret med lysspredningsteknikken.
- Det bør endvidere overvejes om der skal indføres en differentieret kontrolværdi (forskellige kontrolværdier for de forskellige Euro motorer), der svarer bedre til principgodkendelsens krav om 80 % reduktion.
- Beslutningen om en evt. skærpelse af kontrolværdien samt skift af målemetode ved syn bør afvente resultaterne fra TEDDIE undersøgelsen, der forventes afsluttet med udgangen af 2011 /43/.
- En alternativ vej til at reducere antallet af ultrafine partikler i byerne er at fastsætte en kontrolværdi ved syn baseret på antal af partikler. Pt. vurderer vi at der ikke er velegnede målemetoder til efterkontrol af en sådan kontrolværdi. Metoderne er udviklet, men det bliver uforholdsmæssigt dyrt at indkøbe og betjene dem korrekt i synshallerne.

Vejsidekontrol

- En del af de alternative metoder, der er beskrevet i denne rapport (herunder især P-TRAK i kombination med et fortyndingsudstyr og MPM 4) kan potentielt anvendes ved fx vejsidekontrol med efterfølgende indkaldelse til ekstra synskontrol. Generelt kræver de alle en nøje beskrivelse af hvordan metoden håndteres i praksis, herunder definition af den værdi som måleren skal vise før køretøjet indkaldes til ekstra kontrol. Sandsynligvis er det også nødvendigt at kalibrere målerne overfor dieselpartikler.

7 Referenceliste

- 1 <http://www.trafikstyrelsen.dk/DA/Groen-Transport/Luftforurening-fra-biler/Partikelfiltre-tunge-koeretoerjer/Godkendelse-af-partikelfiltre.aspx>
- 2 Council Directive 96/96/EC of 20 December 1996 on the approximation of the laws of the Member States relating to roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers.
- 3 BEK nr. 66 af 22/01/2007: Bekendtgørelse om miljøzoner.
- 4 Færdselsstyrelsen. Meddelelse om køretøjers indretning og udstyr mv. 15.06.2007. Meddelselse nr 1898, J. nr. FS315-000159.
- 5 Miljø- og Planlægningsudvalget 2010-11 MPU alm. del , endeligt svar på spørgsmål 516 fra Folketinget:
<http://www.ft.dk/samling/20101/almdel/mpu/spm/516/svar/794866/979333.pdf>
- 6 Færdselsstyrelsen, Storskala forsøg med partikelfiltre på tunge dieselmotorer i Odense, Juni 2002.
- 7 A E Dodd and Z Holubecki, 1965/10 The Measurements of Diesel Exhaust Smoke.
- 8 Færdselsstyrelsen. Vejledning om syn af køretøjer.
- 9 Kim Winther, Henrik Tarp, Teknologisk Institut, Motor- og Køretøjsteknik. Miljøstyrelsen Miljøprojekt nr. 1373, 2011. Miljøzoner i EU. Kontrolforanstaltninger i udvalgte lande med særligt fokus på målemetoder for partikler samt godkendelse af eftermonterede filtre.
- 10 Fx Midttraffiks miljøsynsmanual.
- 11 Majewski, W.A. (2001). Diesel Particulate Filters. Dieselnet Technology Guide. www.dieselnet.com
- 12 DCL, Website: <http://www.dcl-inc.com/component/content/article/15>
- 13 Ntziachristos, Fragkiadoulakis and Samaras, Aristotle Univ. Thessaloniki (2011). Exhaust Particle Sensor for OBD application.
- 14 Burtscher, H. (2001). Literature study on Tailpipe Emission Measurements for Diesel Engines. Report for the Particle Measurement Programme/BUWAL/GRPE, March 2011.
- 15 Mayer, A. (2006). Why use size, substance and number of solid particles instead of PM-mass to characterize and limit emissions of IC engines. Presentation at SCAQMB/CARB Los Angeles, April 30 – May 2, 2006.
- 16 Slides: Combustion DPF Testing System April 2011.
- 17 Seiler, Boeckmann and Eilts (2008). Performance of Undamaged and Damaged Diesel Particle Filters.
- 18 ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement. Part 1-10.
- 19 Anderson, J. et al. (2010). Particle Measurement Programme (PMP). Heavy-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE_HD) Final Report.
- 20 Carli, VW (2011) ENV02 Kick-off-Workshop, Braunschweig: Measurement of Particulate Emissions of Modern Combustion Engines
- 21 Micro-PSS Particulate sampling system for on-road test, website: http://www.exisab.com/Docs/Brochures/MICRO-PSS_description.pdf
- 22 ISO 16183 (2002). Heavy duty engines -- Measurement of gaseous emissions from raw exhaust gas and of particulate emissions using partial flow dilution systems under transient test conditions.
- 23 Dr. Harald Neumann, Robert Bosch GmbH, CITA conference, 4-6th May 2011, Berlin. Trends of Vehicle Testing Technology.
- 24 ISO 11614: 1999. Reciprocating internal combustion compression-ignition engines – Apparatus for measurement of the opacity and for determination of the light absorption coefficient of exhaust gas.
- 25 SICK Optic electronic, Reflektor, Særnummer 1994, 2 årgang

-
- 26 Verein Deutcher Ingenieure, VDI 2066 bla. 4, Measurement of Particulate Matter in Flowing Gases – Determination of Dust Load by Continuous Measurement of optical Transmission.
 - 27 Samtale med Prof. Dr. Volker Ebert, PTB (Physikalish-Technische Bundesanstalt) d. 27/6-2011.
 - 28 Samtale med Klaus Burger, MAHA Maschinenbau Haldenwang, 1 sept. 2011.
 - 29 Trafikstyrelsen, Dorte kubel: Røgtæthed for tunge køretøjer, 1 sept. 2011.
 - 30 Martin Angelo (2010). Slides: Måling af støv, teknologier og begrænsninger.
 - 31 BOSCH, website: http://aa.bosch.de/boaa-default/Product.jsp?prod_id=475&ccat_id=77&language=en-GB&publication=3
 - 32 AVL flyer og datablad for AVL DiTEST Smoke 2000.
 - 33 MAHA, website: http://www.maha.de/cps/rde/xchg/SID-F072AF12-56D9224A/maha_internet/hs.xml/opazimeter_II_generation_MET_6_2.htm
 - 34 AVL Smoke Meter 415S: <https://www.avl.com/smoke-meter>
 - 35 Baron and Wileke (ed) (2001). Aerosol Measurement – Principles, Techniques and Applications. John Wiley and Sons (2nd ed.).
 - 36 P-Trak[®] Ultrafine Particle Counter, TSI website [http://www.tsi.com/en-1033/categories/indoor_air_quality/2306/p-trak%C2%AE_\(ih\)_ultrafine_particle_counter.aspx](http://www.tsi.com/en-1033/categories/indoor_air_quality/2306/p-trak%C2%AE_(ih)_ultrafine_particle_counter.aspx)
 - 37 DustTrack[™] II Aerosol Monitor, Theory of Operation. TSI Application Note EXPMN-001.
 - 38 MAHA MPM 4. MAHA hjemmeside: http://www.maha.de/cps/rde/xchg/SID-BE8922B0-0130EE0B/maha_internet/hs.xml/MPM-4M.htm
 - 39 Pegasor particle sensor PPS, website: http://www.pegasor.fi/main/free/stuff/Pegasor_PPS_brochure.pdf
 - 40 Cambustion dms website: <http://www.cambustion.com/dms>
 - 41 AVL Micro Soot Sensor, website: <https://www.avl.com/micro-soot-sensor>
 - 42 Multari, Anyon and Tschinkel. Poster at 15th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, june 2011, Zürich: Update of Gasoline and Diesel I/M Programs.
 - 43 CITA, website: <http://www.cita-vehicleinspection.org/LinkClick.aspx?fileticket=bnUd0wUA8s%3D&tabid=442>