



Titel: Partikelfiltre til biler

Forfatters titel: Diplomingeniør

Navn: Peter Jessen Lundorf

Ansættelsessted: Center for Grøn Transport - Trafikstyrelsen

Emissioner fra dieselmotorer

Ved forbrænding af dieselbrændstof bliver der dannet mange forskellige stoffer, der er mere eller mindre skadelige.

De vigtigste emissioner fra en dieselmotor er:

- Kuldioxid - CO₂
- Kulbrinte - HC
- Nitrogenoxid - NO_x (fællesbetegnelse for NO og NO₂)
- Kulstofpartikler - C (sodpartikler)
- Kulmonoxid - CO
- Svovldioxid - SO₂

For at mindske udledningen af de skadelige stoffer, kan man enten regulere forbrændingen vha. f.eks. indsprøjtningen, udformningen af forbrændingskammeret, turbetrykket, EGR forholdet eller lave efterbehandling af udstødningsgasserne med f.eks. en katalysator eller et partikelfilter. En EGR-ventil (Exhaust Gas Recirculation valve) sørger for, under visse forhold, at recirkulere en del af udstødningsgassen tilbage i motorens forbrændingskammer. Ved at blande den iltfattige udstødningsgas med ny tilført luft kan man mindske NO_x udledningen fra motoren.

På både benzin- og dieselmotorer sidder der en katalysator i udstødningen, der har til formål at omdanne de skadelige stoffer til uskadelige stoffer. Den relativt lille mængde af f.eks. CO og HC, der er til stede i udstødningsgassen, bliver omdannet til hhv. CO₂ og H₂O.

I en benzinmotor er der kun en meget lille andel af sodpartikler i udstødningsgassen, og derfor er der ikke behov for et partikelfilter.

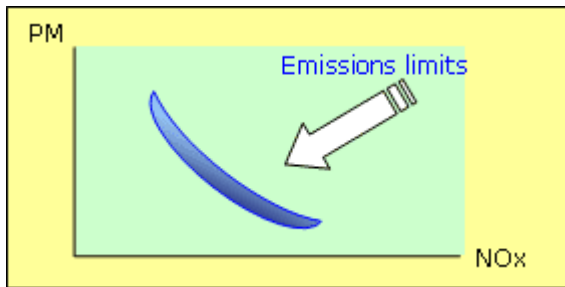
Trade-off mellem NO_x og sodpartikler

I en dieselmotor kan man populært sagt vælge, om man vil have højt partikeludslip og lav NO_x emission eller lavt partikeludslip og høj NO_x emission. Jo højere temperaturen er i forbrændingskammeret, des højere er andelen af NO_x i forhold til partiklerne og vice versa.

Ved at regulere iltindholdet i forbrændingskammeret med f.eks. en EGR-ventil, kan man justere forbrændingstemperaturen og derved forholdet mellem partikler og NO_x. En EGR-ventil kan lede en del af den iltfattige udstødningsgas tilbage i forbrændingskammeret. Der sidder en EGR-ventil på de fleste moderne dieselmotorer.

Det er motorudviklerne, der ved hjælp af den valgte emissionsstrategi, balancerer forholdet mellem NO_x og partikler i motoren, så motoren og udstødningssystemet arbejder optimalt sammen. I udstødningsystemet sidder der typisk en katalysator efterfulgt af et partikelfilter.

Alle processer i motoren og udstødningsystemet bliver styret af en motorstyringsenhed, også kaldet ECU (Engine Control Unit), og i en motor med partikelfilter er der en regenereringsstrategi i ECU'en, der sørger for, at partikelfilteret fungerer optimalt hele tiden.



Figur 1: Trade-off mellem NO_x og sodpartikler

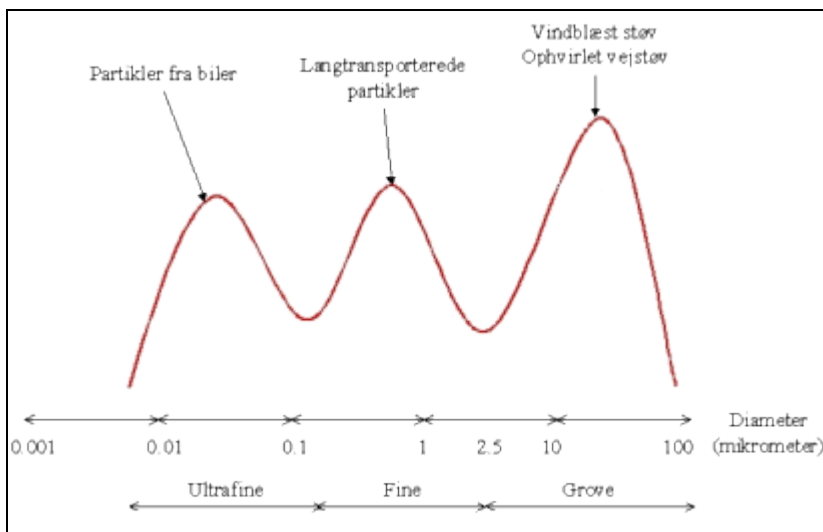
Partikler

Dieselmotorer udleder partikler, der er skadelige for helbredet og kan give luftforureningsproblemer i byerne.

Betegnelsen partikler dækker over en kompleks blanding af faste komponenter, der varierer i både størrelse, overflade, form, kemisk sammensætning m.m. Partiklerne kan komme fra både naturlige og menneskeskabte kilder. Partikler kan udsendes direkte til luften (primære partikler), eller de kan dannes i luften ud fra andre forureninger (sekundære partikler).

De primære partikler kan stamme fra menneskeskabte kilder såsom trafik, kulfyrede kraftværker, industrianlæg m.m. De kan også stamme fra naturlige kilder såsom pollen, vindblæst jord m.m. De sekundære partikler består primært af sulfat, nitrat og forskellige organiske forbindelser, der dannes langsomt, når luftmasser transporteres over lange distancer.

Luftens indhold af partikler forekommer typisk i tre tydeligt adskilte størrelsesfraktioner: ultrafine partikler, fine partikler og grove partikler.



Figur 2: Typisk størrelsesfordeling af partikler i luften

Note: Formen af kurven afhænger af den valgte enhed på den lodrette akse. Hvis enheden er vægt (masse) af partikler, vil den ultrafine del af fordelingen forsvinde. Det samme vil være tilfældet med den grove del af fordelingen, hvis enheden er antal partikler.

De ultrafine partikler stammer typisk fra dieselmotorer. De er enten dannet ved høje temperaturer i motorerne eller ved kondensation i udstødningsrøret. De fine partikler dannes typisk, når de ultrafine partikler samler sig ved kondensering. De sekundære partikler tilhører også denne gruppe. De grove partikler er typisk

mekanisk dannede partikler (vindblæst støv, ophvirvlet vejstøv samt sliddele fra dæk og bremses).
Partikler, der stammer fra forbrændingsmotorer, består primært af sod (uforbrændt kulstof), kulbrinter, svovlforbindelser og aske.

Svovl

Svovlindholdet i dieselolie har stor betydning for partikeludslippet, og et højere svovlindhold vil – alt andet lige – føre til et højere udslip af partikler.

Svovlindholdet i diesel til vejtransport er fastlagt i et fælles EU-direktiv. Ifølge EU-direktivet må diesel fra 1. januar 2010 maksimalt indeholde 10 ppm svovl (også kaldet svovlfri diesel). Det maksimale svovlindhold er således blevet reduceret med over 99 % de senere år – fra over 0,2 % før 1993 til 10 ppm i dag. I Danmark har svovlindholdet i diesel dog været 10 ppm siden 2005, hvor der blev indført en afgiftsdifferentiering mellem svovlfri diesel og diesel med højere svovlindhold. Afgiftsdifferentieringen fik de danske olieselskaber til at skifte til udelukkende at sælge svovlfri diesel.

Svovlforbindelser kan ødelægge efterbehandlingsudstyr til dieselmotorer, såsom partikelfiltre og katalysatorer. Svovlfri diesel er derfor en forudsætning for, at efterbehandlingsudstyret fungerer og har en lang holdbarhed.

Euronormer

Euro-normer betegner de totalharmoniserede udstødningsnormer for motorer, der gælder i EU. Det første sæt Euro-normer for motorkøretøjer trådte i kraft i 1993, og siden da er normerne blevet skærpet i flere omgange. Der er også vedtaget Euro-normer for motorcykler, knallerter, ikke-vejgående maskiner (traktorer og entreprenørmaskiner samt motorsave og plæneklippere) samt for lokomotiver og fartøjer på indre vandveje.

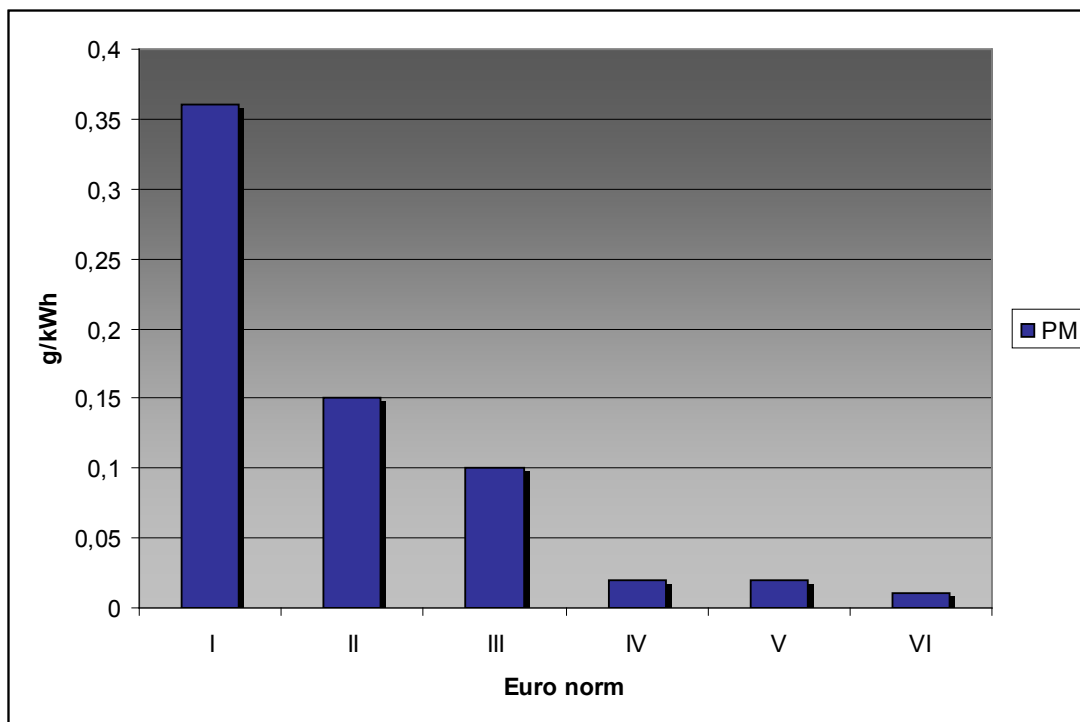
Tunge køretøjer

Euro V normen for tunge køretøjer, såsom lastbiler og busser over 3,5 ton, er gældende i øjeblikket, og den trådte i kraft den 1. oktober 2009. Euro VI normen træder i kraft den 1. januar 2014 med skærpede grænseværdier for HC, NOx og PM samt krav til antallet af partikler.

Tabel 1: Grænseværdier for Euro V normen for tunge køretøjer

CO	1.5	g/kWh
HC	0.46	g/kWh
NOx	2.0	g/kWh
PM	0.02	g/kWh
Røg	0.5	m ⁻¹

Figur 3 viser, at grænseværdierne for partikeludledningen er faldet markant siden Euro I trådte i kraft, og at der er en reduktion i kravet til partikeludledningen fra Euro III til Euro IV på 80 %. Dette svarer til det skærpede miljøzonekrav for partikeludledning, hvor der kræves et effektivt partikelfilter på alle Euro III lastbiler og busser.



Figur 3: PM grænseværdier for tunge køretøjer i forhold til Euronormer

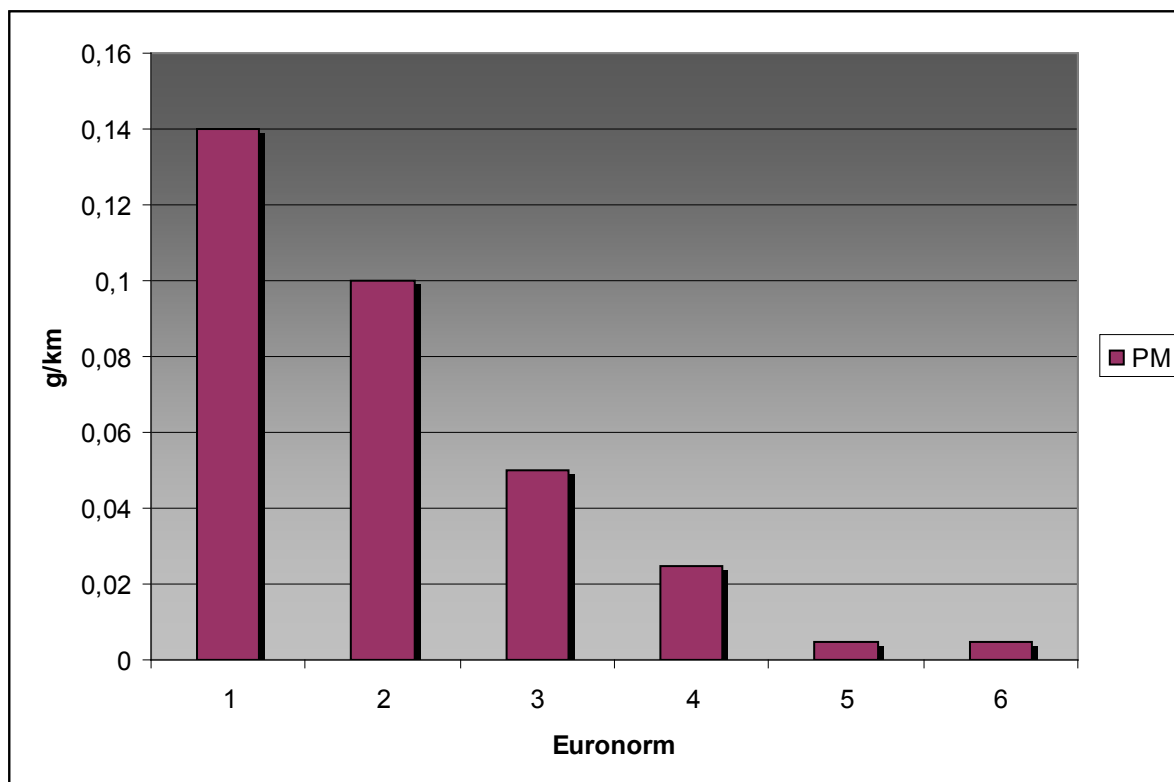
Lette køretøjer

For lette køretøjer, såsom person- og varebiler, gælder i øjeblikket Euro 4 normen, der trådte i kraft den 1. januar 2006. Pr. 1. januar 2011 bliver Euro 5 normen obligatorisk for nye personbiler, og fra 1. januar 2012 for varebiler med skærpede krav til HC, NO_x og PM samt antal af partikler. I praksis betyder skærpelsen af PM grænseværdien fra 25 mg/km til 5 mg/km samt kravet til antal partikler, at person- og varebiler vil være forsynet med et effektivt partikelfilter for at kunne opfylde kravet.

Tabel 2: Grænseværdier for Euro 4 normen for lette køretøjer

CO	0.50	g/km
HC	-	g/km
HC+NO _x	0.30	g/km
NO _x	0.25	g/km
PM	0.025	g/km

Figur 4 viser reduktionen af grænseværdierne i forhold til Euronormerne, og det ses, at der er et markant fald fra Euro 4 til Euro 5, hvilket betyder, at Euro 5 person- og varebiler i realiteten skal have et effektivt partikelfilter, for at kunne opfylde kravene.



Figur 4: PM grænseværdier for lette køretøjer i forhold til Euronormer

Eftermonterede partikelfiltre til tunge køretøjer

Folketinget vedtog i december 2006 [lov om miljøbeskyttelse](#)¹, der giver kommunalbestyrelserne i København, Frederiksberg, Århus, Aalborg og Odense mulighed for at etablere miljøzoner. København og Frederiksberg besluttede at etablere miljøzone fra 1. september 2008. Ålborgs miljøzoneregler trådte i kraft 1. februar 2009. Miljøzonen i Århus bliver etableret pr. 1. september 2010 og Odenses miljøzoneregler trådte i kraft pr. 1. juli 2010. Ifølge loven skal alle lastbiler og busser som udgangspunkt forsynes med et miljøzonemærke for at få adgang til en miljøzone. Et miljøzonemærke gælder i alle miljøzoner etableret i Danmark.

Miljøministeren har ved [bekendtgørelse nr. 478 af 15. maj 2007](#)² om partikelfiltre, kontrol og mærkning af lastbiler og busser i kommunalt fastlagte miljøzoner mv. fastsat nærmere regler om krav til effektiviteten og godkendelse af partikelfiltrene. Bekendtgørelsen beskriver også synsvirkomhedernes opgaver vedrørende miljøzonekontrol og miljøzonemærkeadministreringen.

I henhold til Miljøministeriets lov om miljøbeskyttelse, se fodnote 1, er der fastsat følgende bestemmelser om miljøzonemærker mv.: Ifølge § 15b skal lastbiler eller busser med dieselmotor (kompressionstænding), og som er registreret med en tilladt totalvægt på mere end 3.500 kg, være monteret med et effektivt partikelfilter efter den 1. juli 2010, medmindre lastbilen eller bussen opfylder Euro IV eller bedre.

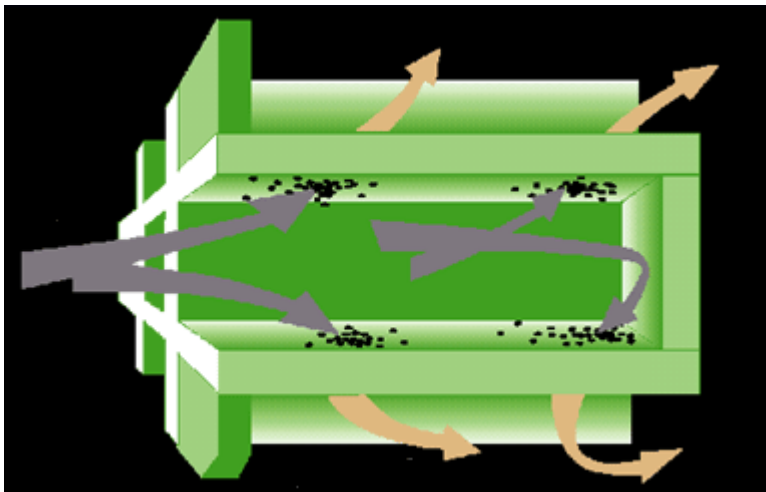
Det påhviler ejeren eller brugeren at sikre sig, at bilen opfylder ovenstående krav.

Det påhviler føreren at sikre sig, at bilen er forsynet med miljøzonermærke ved kørsel i en miljøzone.

Ifølge bekendtgørelsen skal filteret reducere minimum 80 % af partikelmassen målt efter EØF direktiv 88/77 stationær 13-mode test. En reduktion på 80 % svarer til størrelsesordenen for skærpelsen fra Euro III til Euro IV.

[Kravspecifikationen](#)³ i bekendtgørelsen til eftermonterede filtre er baseret på Trafikstyrelsens frivillige principgodkendelsesordning, der blev udviklet i 2006.

For at opnå en reduktion af partikelemissionen på 80 % anvendes et såkaldt effektivt/lukket partikelfilter. Typisk består et lukket partikelfilter af en række kanaler, der er åbne i den ene ende og lukkede i den anden ende. Kanalerne er lavet af et porøst materiale, der bevirker, at sodpartikler opfanges, når udstødningsgassen diffunderer igennem den porøse væg for at kunne komme igennem filteret. Se figur 5.



Figur 5 Principtegning af sod-ophobningen i et lukket partikelfilter

Når et partikelfilter er fyldt med sod, er der behov for, at soden brændes af, så modtrykket ikke stiger til et u hensigtsmæssigt niveau af hensyn til motorens effektivitet og holdbarhed.

Ved temperaturer på ca. 3-500 gr. c., alt afhængig af systemets opbygning, begynder soden at oxidere og derved blive opdannet til CO₂.

I et aktivt system sker regenereringen efter behov og er typisk styret af motorstyringen.

Der er flere måder man kan opnå den nødvendige udstødningstemperatur på:

- "Post injection" sent i forbrændingsforløbet
- Indsprøjtning af diesel i udstødningssystemet før katalysatoren

"Post injection" er en metode, hvor dieselbrændstoffet sprøjtes så sent ind i forbrændingsprocessen, at det forbliver uforbrændt og således passerer videre i udstødningssystemet og ned til katalysatoren, hvor det forbrændes.

I et passivt system regenereres filteret løbende vha. temperaturen i udstødningen. Dvs. det er en forudsætning, at der er en tilstrækkelig høj temperatur til stede, for at regenereringen kan finde sted. Det betyder, at et lukket partikelfilter i et passivt system skal være nøje tilpasset det aktuelle køretøjs køremøn-

ster, så man ikke risikerer for højt modtryk i udstødningssystemet med risiko for at skade motoren.

Sodens nødvendige afbrændingstemperatur kan sænkes ved tilsætning af additiver i brændstoffet. Et additiv har samme virkning som en coating, blot at den katalytiske effekt så at sige følger soden, fra den bliver dannet i forbrændingsprocessen, til den bliver oxideret i regenereringsprocessen. I systemer hvor der anvendes additiv, skal partikelfilteret jævnlige renses, idet det brugte additiv lagres i filteret og efterhånden vil øge modtrykket i udstødningssystemet.

En anden metode, som kan hjælpe soden med at blive oxideret i den katalytiske proces, er at anvende en coating på selve partikelfilteret. Coatingen består oftest af en kemisk blanding med en lille andel af ædelmetaller, såsom platin eller palladium, der dækker filterets overflade i de porøse kanaler, så soden kommer i direkte kontakt med den katalytiske coating og bliver omdannet til CO₂.

Et lukket partikelfilter skal afmonteres og renses, når der er ophobet en vis mængde aske, som ikke kan forbrændes. Asken kan stamme fra motorolien eller fra additiver. Rensningen er relativt simpel og sker oftest vha. høj temperatur og trykluft. Intervallet mellem rensning kan svinge meget, alt efter om det er en person- eller lastbil, og hvor stort olieforbruget er på motoren.

Eftermonterede partikelfiltre til lette køretøjer

Fra 1. april 2010 skal alle ejere af dieseldrevne personbiler og dieseldrevne varebiler, hvis varebilen er registreret første gang efter den 18. marts 2009, betale et partikeludledningstillæg på 1.000 kroner årligt, hvis bilen ikke er udstyret med et partikelfilter.

Formålet med partikeludledningsafgiften er at reducere mængden af skadelige partikler fra dieselmotorer. Ifølge loven bortfalder tillægget, hvis man eftermonterer et partikelfilter.

Det er Center for Grøn Transport, der er ansvarlig for at udforme de regler, et eftermonteret partikelfilter skal overholde og i [bekendtgørelse nr. 1474 dateret 24. december 2009](#)⁴, er reglerne beskrevet nærmere.

Ved eftermontering af et åbent partikelfilter er der flere faktorer, der er interessante at undersøge nærmere. Et åbent filter har en filtreringseffektivitet, der kan ændre sig under ekstreme kørselsforhold, hvor sodbelastningen er høj. Til forskel for et lukket filter der har en mere entydig virkemåde uanset sodbelastningen og kørselsmønster.

Filtreringseffektivitet for åbne filtre

Et åbent filter filtrerer minimum 30 % af partikelmassen ifølge de fastsatte tests, der udføres af et anerkendt prøvningslaboratorium i forbindelse med godkendelse af et partikelfiltersystem. Ved disse tests anvendes bl.a. den nye europæiske kørecyklus, NEDC (New European Driving Cycle), som udgangspunkt for måling af reduktionen af partikelmassen. NEDC er en kørecyklus, der simulerer by-, landevejs- og motorvejskørsel. NEDC kørecyklussen anvendes bl.a. også ved fastsættelse af det EU-typegodkendte brændstofforbrug for benzin- og dieseldrevne person- og varebiler.

Et åbent partikelfilter kan lagre sod i filterstrukturen, indtil det tilgængelige overfladeareal er dækket med sodpartikler. Når det sker, vil udstødningsgassen rela-

tivt frit bevæge sig gennem udstødningssystemet uden at blive filtreret i partikelfilteret. Man kan sige, at et åbent partikelfilter har en dynamisk filtreringseffektivitet, i modsætning til et lukket filter der tilnærmelsesvis altid filtrerer med en ensartet effektivitet. Det åbne filters effektivitet varierer således afhængig af kørselsmønstret og temperaturen i udstødningen.

Blow-off effekt

Ved langvarig kørsel med lave temperaturer, som i f.eks. bykørsel, vil soden lagre sig i filteret uden at blive oxideret til CO₂, og i tilfælde af en kraftig acceleration, hvor luftgennemstrømningen gennem filteret øges markant, kan der opstå en såkaldt blow-off effekt, hvor den lagrede sod bliver blæst ud af filteret uden at blive oxideret til CO₂. Blow-off effektens negative konsekvenser for luftforureningen som helhed vurderes at være af mindre betydning, da laboratorietests har vist, at det kun er under ekstreme forhold, at der frigives uønsket sod. Ifølge [testrapport B186 fra Berner Fachhochschule](#)⁵ i Schweiz fra 2006-2007, hvor fire forskellige filterfabrikater testes, vises det, at selv ved gennemkørsel af en ekstrem kørecyklus, der indeholder langvarig køkørsel med lave udstødningstemperaturer, opnår de fleste filtre en filtreringseffektivitet på over 20 %.

TNO i Holland, der er et uafhængig forskningsorgan, har lavet en omfattende rapport dateret 5. oktober 2009⁶, der omfatter 32 forskellige åbne partikelfiltre fordelt på 10 fabrikater og monteret i 19 forskellige biler. Rapporten viser, at den gennemsnitlige filtreringseffektivitet er minimum 30 %.

Begge de nævnte rapporter konkluderer, at der ikke er en øgning af udledningen af NO₂ med et åbent partikelfilter monteret. Den Hollandske rapport viser endog, at der er en mindre reduktion af NO_x-udledningen.

Det vises også, at et åbent filter reducerer både antallet og mængden af fine og ultrafine partikler.

Brændstofforbruget er ifølge rapporterne heller ikke øget. Jf. [de tyske godkendelsesregler for åbne partikelfiltre](#)⁷ er det tilladt, at brændstofforbruget øges med op til 4 %.

Godkendelse af eftermonteret partikelfilter

[I bekendtgørelse nummer 1474](#), se fodnote 4, der trådte i kraft den 24. december 2009, er reglerne beskrevet nærmere i forbindelse med godkendelse af et eftermonteret partikelfilter.

Krav til eftermonteret partikelfilter

§ 2. Et eftermonteret partikelfilter skal, for at kunne godkendes til fritagelse for partikeludledningsafgift for dieseldrevne personbiler, være godkendt og mærket efter regler i den tyske [Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung \(StVZO\) \(bilag XXVI til § 47 Abs. 3a\)](#), eller godkendt og mærket i henhold til tilsvarende regler i et andet EU-land, EØS-land eller Tyrkiet.

Stk. 2. Såfremt filteret er godkendt efter tilsvarende regler, jf. stk. 1, skal dokumentation for dette indsendes til Færdselsstyrelsen til godkendelse.

§ 3. Et eftermonteret partikelfilter skal for at kunne godkendes til fritagelse for partikeludledningsafgift for dieseldrevne varebiler, være godkendt og mærket efter regler i den tyske [Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung \(StVZO\) \(bilag XXVII til § 48 Abs. 2 og bilag XIV nr. 3.4\)](#), eller godkendt og mærket i henhold til tilsvarende regler i et andet EU-land, EØS-land eller Tyrkiet.

Stk. 2. Såfremt filteret er godkendt efter tilsvarende regler, jf. stk. 1, skal dokumentation for dette indsendes til Færdselsstyrelsen til godkendelse.

§ 4. Et eftermonteret partikelfilter vil ligeledes kunne godkendes til fritagelse for partikeludledningsafgift for, såfremt det dokumenteres, at bilen herefter svarer til en bil af samme model og type med fabriksmonteret partikelfilter, der har et partikeludslip, der ikke overstiger 5 mg/km.

Kontrol

§ 5. Kontrollen, af at et eftermonteret partikelfilter opfylder kravene i § 2, § 3 eller § 4, foretages af en synsvirksomhed.

Dokumentation

§ 6. Når en bil er eftermonteret med partikelfilter og fremstilles til syn i henhold til § 5, skal der forevises dokumentation for at filteret opfylder kravene i § 2, § 3 eller § 4.

Stk. 2. Ved eftermontering af partikelfilter omfattet af § 2 eller § 3 skal der endvidere fremvises dokumentation for, at filteret er godkendt til montering på den aktuelle bilmodel.

§ 7. Pligten til at betale tillægget bortfalder fra det tidspunkt, hvor told- og skatteforvaltningen modtager en anmeldelse fra synsvirksomheden om, at det eftermonterede partikelfilter er godkendt og virker.

Referenceliste

¹ Bekendtgørelse om lov om miljøbeskyttelse nr. 1757 med ikrafttrædelse den 22. december 2006

² Bekendtgørelse om partikelfiltre, kontrol og mærkning af lastbiler og busser i kommunalt fastlagte miljøzoner m.v. nr. 478 med ikrafttrædelse den 15. maj 2007

³ Center for Grøn Transports kravspecifikation til godkendelse af principgodkendte partikelfiltre kan findes på Trafikstyrelsens hjemmeside www.trafikstyrelsen.dk

⁴ Bekendtgørelse nr. 1474 der trådte i kraft den 21. december 2009 om fritagelse for partikeludledningsafgift ved eftermontering af partikelfilter

⁵ Messtechnischer Untersuchung offener Partikelminderungssysteme 2006-2007, Dipl. Ing. A. Meyer, TTM, Berner Fachhochschule, Nidau, Schweiz

⁶ TNO rapport: MON-RPT-033-DTS-2009-03304, 5. oktober 2009, René van Asch og Ruud Verbeek

⁷ Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) (bilag XXVI til § 47 Abs. 3a) for personbiler og Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) (bilag XXVII til § 48 Abs. 2 og bilag XIV nr. 3.4) for varebiler