

Analyse og model for etablering af uafhængig godkendelsesordning for partikelfiltre til brændeovne

August 2023



Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Jes Sig Andersen (Teknologisk Institut),
Rene Lyngsø Hvidberg (Teknologisk Institut),
Lars Schwarzer (Teknologisk Institut)

ISBN: 978-87-7038-538-1

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. 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.

Må citeres med kildeangivelse.

Indholdsfortegnelse

1.	Indledning	5
1.1	Teknologisk stade og udviklingsmuligheder	5
1.1.1	Omvendt forbrænding	6
1.1.2	Spjældautomatik	6
1.1.3	Katalysatorer	6
1.1.4	LowCarbon Brændkammer projektet	6
1.1.5	Andre typer af ovne	7
2.	Delopgave 1 Analyse og model	8
3.	Delopgave 2 Markedsoversigt	9
3.1	Interview med tyske filterfabrikanter	13
3.2	Markedsudvikling	16
3.3	Delkonklusioner, markedsoversigt	17
4.	Delopgave 3 Filtres dokumenterede effekt	19
4.1	Filtrets virkemåde	19
4.2	Reduktion af partikelmasse, PM, og partikelantal, Pn.	21
4.3	Historisk gennemgang af 3. partsmålinger fra diverse studier fra de seneste 11 år.	23
4.4	Målinger og metode til bestemmelse af effektivitet	27
4.5	Delkonklusioner, filter dokumenterede effektivitet	27
5.	Delopgave 4 Krav og kriterier i nabolandene og i miljømærker	29
5.1	Lovgivning og krav	29
5.2	Efterbehandlingsteknologi og tilskudsordninger	30
5.2.1	Schweiz	31
5.2.2	Tyskland	31
5.3	Miljømærkningsordninger	33
5.3.1	Nordic Ecolabel – Svanemærket	33
5.3.2	Flamme Verte	33
5.3.3	Blauer Engel	33
5.4	Delkonklusioner, krav i nabolandene	34
6.	Delopgave 5 Mulige partikelreduktionskrav ved typegodkendelse	35
6.1	Litteraturgennemgang	35
6.2	Analyse af den fundne litteratur	37
6.3	Andre oplysninger	38
6.4	Sekundær aerosoldannelse og helbredseffekter	39
6.5	Delkonklusion, partikelreduktionskrav	41
7.	Delopgave 6 Model til rensning og vedligehold	44
7.1	Model til rensning og vedligehold	44
7.2	Overvejelser om administrationsmodel	45
7.3	Simpel model	45

8.	Hovedopgaven Model for godkendelsesordning	46
8.1	Temaer fra litteraturstudiet.	46
8.1.1	IEA Biomass Task 32 eksperterne skriver i rapporten fra oktober 2022 [18];	46
8.1.2	Universitet STUTTGART skriver i sammenfatningen af undersøgelsen 'Metodisches bewertung von Sekundärmassnahmen für kleine Biomassefeurungen' 2017 [10]	47
8.1.3	UBA skriver om elektrofilter teknologien, dens virkemåde og begrænsninger i Evalueringen af 1. BimSch V forordningen i 2020 [12]	47
8.2	Dokumentation af langtidsegenskaber	48
8.3	Særlige forhold når et elektrofilter bruges sammen med en gammel brændeovn	49
8.4	Kritisk volumen i en godkendelsesordning	51
8.5	Europæisk standard eller ej	51
8.6	Overvejelser om modeller for godkendelsesordning	51
8.7	Muligt indhold af en dansk godkendelsesordning for partikelfiltre	52
8.8	Yderligere optioner	53
8.9	Mulige udfordringer for en national godkendelsesordning	53
9.	Anvendt litteratur	55
10.	Forkortelser	56

1. Indledning

Nye brændeovne skal i dag leve op til de Europæiske ecodesign krav, der fik virkning fra 2022. Kravene indeholder minimumskrav til energieffektivitet og maksimale grænser for emissioner, samt repræsenterer det kompromis som medlemslandene kunne opnå enighed om i 2013, da forordningerne blev skrevet. Allerede for 10 år siden havde de danske brændeovne målopfyldelse af ecodesign kravene. Det skyldes især, at det nordiske svanemærke havde fremmet udvikling og optimering af ovnenes brændkamre og luftsystemer til at indfri lave partikelemissioner samtidig med høj virkningsgrad. Brændeovnsfabrikanternes fokus på både den norske partikelprøve og den europæiske typeprøve til CE-mærkning har samtidig ført til, at danske brændeovne indtager en særstilling, da de i kraft af primære optimeringer af forbrændingsegenskaberne ikke bare brænder godt ved nominel ydelse, men også ved lavlast.

Trods to runder med støttede skrotningsordninger i 2015-16 og igen i 2019-20 på til sammen 92 millioner, er der stadig en restpopulation af gamle brændeovne tilbage. Miljøstyrelsen har tidligere vurderet at der var ca. 200.000 brændeovne, der var ældre end fra 1995. Skrotningsordningerne har fjernet ca. 40.000 af de gamle ovne, og den løbende udskiftning af gamle brændeovne med nye er også med til at nedbringe bestanden af de gamle brændeovne. Og senest har ejerskifteordningen fra medio 2021 også været med til at accelerere udskiftningen af de gamle brændeovne ældre end 2003. Ifølge oplysninger fra Skorstensfejlerlauget medgår op til 70-80 % af salget af brændeovne på ca. 20.000 ovne årligt til udskiftning af eksisterende gamle brændeovne. Al europæisk regulering af brændeovne benytter en massebestemt opgørelsesmetode for emissioner, hvor den samlede partikelmasse bestemmes, og holdes op imod en grænseværdi udtrykt i g/kg brænde efter den norske metode, eller milligram pr. kubikmeter røggas volumen efter Heated Filter-metoden.

Det nye fokus på partikelantal- og størrelsesfordeling påkalder interesse for bedre kendskab til brændeovnes emissionsprofil og for udstyr, der kan bruges til at begrænse antallet af udledte partikler ved hjælp af sekundære behandlingsteknologier. Her er brug af partikelfiltre en oplagt mulighed for begrænsning af både partikelmasse og partikelantal. Men også andre teknologier, som katalysatorer eller dybdefiltre, kan bidrage til at begrænse brændeovnenes emissioner. I Tyskland er der i over 10 år blevet anvendt indbyggede eller eftermonterbare begrænsningsteknologier, dog i betydeligt højere grad sammen med kedler end brændeovne. Det skyldes BImSch V-forordningens krav om feltmåling af fyringsanlæg, der er ældre end 2010.

Formålet med denne undersøgelse er at få belyst partikelfiltres anvendelsesmuligheder, eventuelle begrænsninger, og at skitsere en mulig dansk model for godkendelse af partikelfiltre.

Rapporten er inddelt således, at den kronologisk følger opgaveformuleringens inddelinger i delopgaver. Dog lader besvarelsen af delopgave 1 sig dårligt adskille fra hovedopgaven, så den samlede besvarelse findes i 8. afsnit, hovedopgaven.

1.1 Teknologisk stade og udviklingsmuligheder

Her vil vi kort gennemgå brændeovnenes nuværende teknologiske stade i relation til forbrændingsegenskaber og emissionsprofil. Vi vil også se på teknologiske udviklingsmuligheder, både for brændeovnen alene og for samspil mellem brændeovne, spjældautomatik, partikelfiltre og katalysatorer.

1.1.1 Omvendt forbrænding

Indtil for nylig har så godt som alle brændeovne i Danmark været traditionelle opadbrændende ovne, uafhængige af netspænding, med en enkelt ovn med omvendt forbrænding som undtagelse fra hovedreglen. Omvendt forbrænding er et forgasningsprincip hvor det ikke er træet der brænder, men de frigivne pyrolysegasser. Omvendt forbrænding har længe været et kendt princip fra fastbrændselskedler. Der har været en fælles forståelse i branchen af brændeovne som enkle og pålidelige mekaniske konstruktioner, der ville fungere som back-up varmekilde i tilfælde af udfald af fjernvarme eller elnettet. Hvor forsyningssikkerheden hidtil har været tårnhøj i Danmark, har brændeovnene spillet en reel rolle som back-up varmekilde i Norge, hvor strømmen godt kan være væk i en uge eller to på grund af naturgivne omstændigheder som jordskred eller bortskylning af forsyningslinjer pga. smeltevand. Den seneste tids begivenheder med sabotage mod Northstream II gasledningerne i Østersøen, fremmed kortlægning af elkabler, og anden kritisk infrastruktur i Nordsøen understreger, at vi ikke automatisk kan tage samme høje grad af forsyningssikkerhed for givet i fremtiden.

1.1.2 Spjældautomatik

Industrien haft succes med at videreudvikle og forfine ovnenes forbrændingsegenskaber, så de til enhver tid har kunne leve op til nationale krav, EU-krav samt ecolabel krav for det nordiske svanemærke. I mange år var der kun en enkelt dansk brændeovnsfabrikant, der systematisk anvendte spjældautomatik. De første mange år som passiv mekanisk spjældautomatik, hvortil fabrikanten senere udvidede til elektronisk styret spjældautomatik. Siden er der kommet endnu en fabrikant, der benytter en simpel mekanisk lukkemekanisme til at trække opstarts-spjældet i 5-7 minutter efter genpåfyldning. Sådan var situationen til omkring 2020. De sidste par år er flere brændeovnsfabrikanter begyndt at introducere spjældautomatik som alternativ til den traditionelle manuelle spjældbetjening. Det kan enten være egne konstruktioner, eller ved indbygning af elektroniske standardløsninger fra systemleverandører af spjældautomatik som eksempelvis tyske Mertik eller Fumis, også kendt som OEM-leverandører. Spjældautomatik indebærer den fordel, at automatikken mindsker eller eliminerer konsekvenserne af fejlbetjening af ovnen, hvilket fører til lavere emissioner. Det er ikke urealistisk at en ovn, forsynet med en god spjældautomatik, kan opnå omtrent de samme forbrændingsegenskaber, som ovnen præsterede ved typeprøven.

1.1.3 Katalysatorer

Idet danske brændeovne ikke har været udfordrede af ecodesign krav, har der endnu ikke været nogen synderlig tilskyndelse til at indbygge katalysatorer i ovnene eller benytte et elektrofilter som efterbehandlingsteknologi. Men situationen kan tænkes at ændre sig, hvis der indføres skærpede miljøzonerkrav i Danmark eller på eksportmarkederne. I forvejen har en del fabrikanter sørget for at have en gasbrændeovn på programmet for også at kunne betjene markedssegmenter i udlandet, hvor der lokalt er indført forbud imod brændefyring. I byen Krakow i Polen har brændeovne således været forbudt siden 2019. I London er derfra begyndelsen af 2023 indført emissionsgrænser, der i praksis udelukker brændeovne i nybyggede og renoverede huse.

1.1.4 LowCarbon Brændkammer projektet

Foreningen af danske brændeovnsfabrikanter, DAPO har tidligere udviklet en brændeovn med optimale forbrændingsegenskaber under MUDP-projekt 1946, LowCarbon Brændkammer. Formålet med projektet var at tilsidesætte traditionelle design hensyn og prøve at optimere forbrændingskvaliteten mest muligt. Projektet havde særligt sigte på begrænsning af emission af Black Carbon, men det viste sig at også at både virkningsgraden og de traditionelle emissionskomponenter blev positivt forbedrede som følge af optimeringen. Eksempelvis steg LCB-ovnens virkningsgrad med 5 % og emissionen af de uforbrændte gasser faldt med ca. 60%, når man sammenlignede med gennemsnittet af de almindelige ovne i referencegruppen. Resultaterne blev opnået ved optimering af brændkammer geometri og luftsystemet. LCB-ovnen afskiller sig blandt andet fra ovnene i referencegruppen ved at have mindre glas areal og

mere masse ovenover brændkammeret. Der henvises til projektrapporten for yderligere oplysninger.

1.1.5 Andre typer af ovne

Som alternativ til brændeovne findes både pilleovne og masseovne. Begge typer har en vis udbredelse i Danmark.

En pilleovn brænder kontinuerligt, med styret tilførsel af forbrændingsluft og træpiller. Det er et andet forbrændingsprincip end de portionsfyrede brændeovne, og pilleovne har generelt lavere emissioner og lidt højere virkningsgrad end brændeovne. Pilleovne kræver netspænding for at kunne fungere, da både forbrændingsluftblæseren og pille sneglen er elektrisk drevet.

En pilleovn kræver daglig rensning af brugeren for at opretholde optimal forbrændingskvalitet. Princippet i en masseovn er at etablere en kraftig afbrænding og akkumulere varmen i en stor masse af sten, hvorfra varmen langsomt afgives til rummet. En masseovn fyres med en stor portion brænde én gang i døgnet. Forbrændingen sker ved fuld lufttilførsel. En masseovn har højere emissioner end en brændeovn medens den brænder. Til gengæld brænder masseovnen kun et par timer hvert døgn. De fleste masseovne i Danmark er håndbyggede på stedet af en ovnsætter.

Både pilleovne og masseovne vil kunne opnå reduktion af emissionerne ved samtidig brug af et partikelfilter. Det vurderes mere relevant for masseovne end for pilleovne, der i forvejen har ret lave emissioner.

Der er ingen teknologiske barrierer for at flere danske brændeovnsfabrikater kunne indføre spjæld-automatik, katalysatorer eller begynde at bygge ovne med omvendt forbrænding. Det formodes at ske i samme øjeblik markedet begynder at efterspørge flere af disse rent brændende ovntyper.

2. Delopgave 1 Analyse og model

Opgaveformulering:

" Hovedopgaven er at levere en analyse og model for, hvordan en uafhængig godkendelsesordning eller certificering for partikelfiltre kan etableres. Formålet er at sikre **en høj og varig effekt** af filtrene i praksis. Dette er vigtigt, hvis filtre skal udbredes i større omfang, herunder evt. indgå som valgmulighed i stedet for udskiftning i ejerskifteordningen og den kommunale forbudsmulighed mod ældre brændeovne. Ordningen skal **primært fokusere på filtre til brændeovne**, men muligheden og relevansen for at udbrede godkendelsesordning til filtre til andre biomasse-fyringsanlæg (pillefyr, brændekedler, halmfyr mv.), skal også reflekteres i opgaveløsningen."

Og videre ...

" Der ønskes en model for, hvordan en uafhængig godkendelsesordning eller certificering for partikelfiltre kan etableres for at sikre en høj og varig effekt af filtrene. Analysen skal baseres på nedenstående 5 delanalyser (punkt 2-6).

Der kan anvendes eller trækkes inspiration fra certificeringer fra Tyskland og Norge. Herunder skal det afdækkes, hvad de nuværende krav er til partikelreduktion (PM_{2,5} og PM_{0,1}) i de to landes nationale ordninger mv."

Da det har været vanskeligt at adskille besvarelsen af delopgave 1 fra besvarelse af hovedopgaven, henvises der til den samlede besvarelse under hovedopgaven i afsnit 8.

3. Delopgave 2

Markedsoversigt

Opgaveformulering:

" Der ønskes en ajourført oversigt over tilgængelige partikelfiltre til brændeovne, som er på markedet, både danske og udenlandske producenter, samt nuværende og forventet prisniveau ved nuværende og større udbredelse.

Oversigten skal indeholde information om, hvorvidt filtrene til private brændeovne kan anvendes til gamle og/eller nye brændeovne, samt hvilke forskellige typer skorstene de kan anvendes på "

Teknologisk institut har undersøgt markedet for partikelfiltre. Undersøgelsen er dels baseret på litteraturstudier af diverse rapporter, og dels ved at kontakte fabrikanten af de godkendte partikelfiltre, der findes på Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) liste over godkendte partikelfiltre. Undersøgelsen går tilbage til slutningen af 00'erne, hvor Tysklands indførelse af BImSch V [2] forordningen kickstartede udvikling af en række partikelfiltre, dog primært rettet mod fastbrændselskedler. I det perioden strækker sig over ca. 30 år, indgår der også en teknologioversigt, der viser ind- og udfasning af filtertyper samt teknologier på markedet. Oversigten viser, at mange filtre er blevet udviklet i tidens løb, men nogle har kun haft en relativ kort levetid.

Oversigten tager særligt udgangspunkt i kilderne:

- MST Miljøprojekt nr 1393 fra 2011 FORCE m.fl. [3]
- IEA Task 32 rapport, Survey of particle precipitation devices fra 2011 [4]
- Miljøprojekt nr 1621 fra 2014, MiljøKat en katalytisk enhed til røggasrensning (Teknologisk Institut) [6]
- Miljøprojekt nr 1705 fra 2017, Forprojekt om rensning af brænderøg (PHX Innovation) [7]
- Listen over godkendte filtre på DIBt's hjemmeside
- UBA's evaluering af 1. BImSch V forordningen 2020 [12]
- Listen over ovne der er godkendt efter Blauer Engel miljømærket 2022

TABEL 1. Samlet markedsoversigt over kendte partikelfiltre fra 2011 til 2022. De nederste otte rækker repræsenterer enten sammenbygninger mellem kendte filtre og specifikke ovne eller kedler, eller er så specielle, at de ikke kan anses som universelt anvendelige.

Hvor intet andet oprindelsesland er oplyst stammer filtret fra Tyskland.

*) Filtre særligt egnede til brændeovne- hvortil kommer det helt nye filter

Schröder Future Emission Control

	Miljø- projekt	IEA Task 32	Miljø- projekt	Miljø- projekt	Evaluation	DiBt godk	Blauer Engel
	1393	Rapport	1621	1705	1. BlmschcV		Godk ovne
	2011	2011	2014	2015	2020	2022	2022
	Force		DTI	PHX	UBA	Dibt	RAL
Zumikron ESP (Schweiz)	X	X				X	
Spartherm Airbox ESP (Schweiz)	X	X					
Clean Air ESP	X						
MoreCat MEKAT katalysator	X	X	X				
Exoxy Retrofit (Norge)	X						
Exodraft ESP (Danamrk)*					X	X	
Airjekt 1 (inc V.2) ESP*					X	X	X
CCA-Mini ESP		X			X	X	
CC 25 ESP					X		
KaminFILTERKat katalysator*						X	
OekoTube In- sinde/Outside ESP (Schweiz)		X		X	X	X	X
OekoTube OT2 ESP (Schweiz)					X		X
OekoRona ESP (Schweiz)						X	
AL-TOP ESP		X				X	
Airjekt 25 ESP						X	
Cyclojekt Cyklon+ESP						X	
Ruff-Kat ESP		X		X			
APP ESP		X		X			
Bosch ESP		X					
Spanner SF 20 ESP		X					
Nasu TSP – Tassu ESP (Finland)		X					
Kamin-Feinstaubkiller TH-AE ESP		X					
Windhæger ESP (Østrig)		X					

Flue Gas Condenser UEF (Finland)	X
Flue Gas Condenser Öko Carbonizer – Bschor	X
Pellematic with inte- grated Flue Gas Condenser (Østrig)	X
Hark Eco Plos stove with inter ceramic filer	X
Ceramic filter – In- terfocos (Holland)	X
Klima-Kat Caminos	X
Flue-gas Well (Svergie)	X

Tabellen viser en bruttooversigt over tidligere afprøvede filtre. De filtre, der er særligt egnede til brug sammen med brændeovne, er markeret med en stjerne (*). De nederste otte rækker er mærket op, fordi de enten har en teknologi eller repræsenterer en fast sammenbygning mellem en bestemt ovn eller kedel, der gør, at de ikke kan anses som universelt anvendelige. Det fremgår, at der var stor aktivitet i begyndelsen af 2010'erne, hvor en snes virksomheder var i gang med at udvikle partikelfiltre, eller havde haft nogle på markedet i et par år.

Det er dog langt fra alle, der er endt som modne filterprodukter på markedet. I skrivende stund er der 10 forskellige filtre på DIBt's liste over godkendte filtre. Enkelte fabrikater har været ret vedholdende, og har været med siden begyndelsen af 2010'erne. Det gælder således Kutzner&Weber med Airjekt 1 og OekoSolve med OekoTube Inside og OekoTube OT-2. De to sidstnævnte fabrikater er stadig helt i front som filtre, der er godkendt sammen med en ovn til Blauer Engel. Derimod hersker der tvivl om, hvorvidt Carola Clean Air med CCA-Mini stadig er aktive. Det har ikke været muligt at komme i kontakt med dem under interviewundersøgelsen blandt udvalgte fabrikater.

Som der er sket en udskillelse blandt fabrikaterne, har teknologierne på samme måde indsnævret sig til næsten udelukkende at gøre brug af elektrostatiske rensning. Af de 10 filtre (brutto) på DIBt's liste er der ni af typen ESP, og kun en er katalytisk virkende. Flere filterfabrikater anpriser deres filtre som egnet både til kedler og brændeovne, og det er formentlig korrekt set ud fra en teknologisk betragtning. Dog kan forhold som fysisk størrelse, fremtræden og anskaffelsespris alligevel i praksis udelukke brug af egentlige kedel-filtre sammen med brændeovne. Herunder ses en oversigt over filtre, der af UBA [12], er vurderet som egnede til brug sammen med brændeovne. Dertil har Teknologisk Institut tilføjet katalysator, en Kamin-FilterKat, der er let at installere og renholde, billig i anskaffelse, men som ikke er lige så effektiv som elektrostatiske filtre. Til gengæld har vi fravalgt den CCA 25 som UBA ellers havde udpeget som egnet til brændeovne. CCA 25 er en gulvmodel af samme størrelse som en brændeovn.

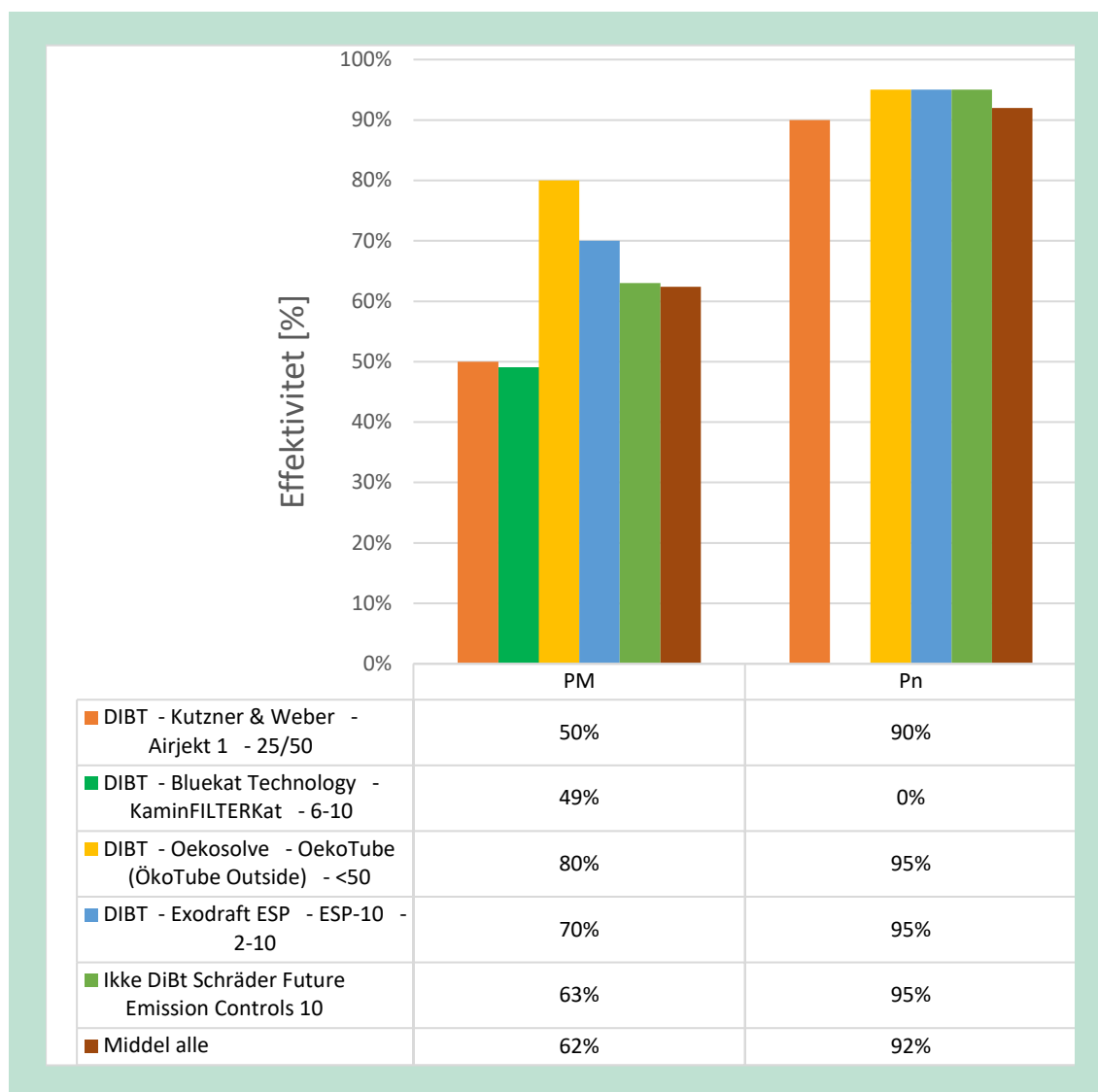
De herunder nævnte filtre er egnede til både murede skorstene og stålskorstene. Nogle andre filtertyper end de nævnte anvender spray med en vandtåge til rensning. De vil ikke være egnede til murede skorstene på grund af risikoen for ophobning af fugt i murværket og risiko for frostsprængning af murstenene. I Danmark vurderer Skorstensfejerlauget, at der stadig er en overvægt af murede skorstene i den eksisterende bygningsmasse, men at tilvæksten af nye skorstene primært er stålskorstene. I det meste af nybyggeriet er der ingen skorsten.

TABEL 2. Udvalgte filtre egnede til brug sammen med brændeovne.

Fabrikant	Model	Effektområde	Rensning	Partikelmasse reduktion*	Pris DKK incl Dansk moms, excl installation
Kutzner & Weber	Airjekt 1	25 kW	Manuel	50% - 90%	24.620
Exodraft	ESP10	10 kW	Automatisk	70%	13.400
OekoSolve	OekoTube- Outside	50 kW	Manuel	70% - 90%	19.450
Bluekat Technologies	Kamin Filter Kat	6-10 kW	Manuel	30%	3.750
Schröder	FEC	20 kW	Manuel	95%	23.450

*) Kilde: produktcertifikater på DiBt's hjemmeside.

Efter svar fra filterfabrikanter er gennemgået, er der tilføjet endnu et brændeovnsfilter, en Schröder Future Emission Controls (FEC), der virker ved en kombination af en katalysator og derefter et elektrofilter. FEC er et nyt produkt der i 2022 blev præsenteret på det faglige forum i Tyskland, 13. Fachgespräch Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen. Begivenheden afholdes årligt af DBFZ og TFZ i forening. Listepriisen oplyses af Schröder til 2.500 EUR og effektiviteten er oplyst til 95% massereduktion. Et par af filtrene er stadig overdimensionerede til brændeovne, idet en brændeovn typisk har 6-8 kW varmeydelse i Tyskland og lidt mindre i Danmark. Kun tre filtre er udelukkende målrettede brændeovne, nemlig Schröder FEC, ESP10 og KaminFilterkat.

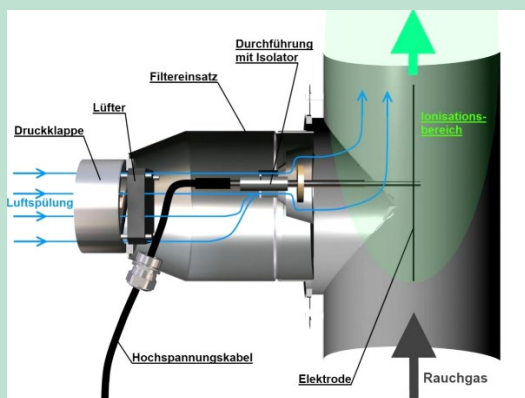


FIGUR 1. De fem til brændeovne udvalgte filters relative effektivitet i %, henholdsvis som mas-sereduktion (PM) og antalsreduktion (Pn) (KaminFilterKat har ingen oplyst antalsreduktion)

3.1 Interview med tyske filterfabrikanter

Teknologisk Institut har skriftligt henvendt sig til fem udvalgte fabrikker, der var repræsente-ret med otte filtre på DIBT's liste, og efterfølgende kontaktede dem, som ikke havde besvaret den skriftlige henvendelse, via telefon. Fabrikkerne blev bedt om at bekræfte oplysningerne og nævne en vejledende listeprijs. Derudover blev der spurgt om, hvorvidt rensningen foregår au-tomatisk eller manuelt, og i hvilke intervaller rensningen skulle foretages. For produkter, der er egnet både til brændeovne og til kedler, blev der spurgt om en omtrentlig fordeling mellem disse to markedssegmenter. Enkelte fabrikker vendte ikke tilbage og/eller ønskede kun at svare på udvalgte spørgsmål. Carola Clean Airs "CCA-Mini" er formentlig udgået, og medta-ges derfor ikke i rapporten. Produktet bliver ikke længere markedsført på virksomhedens hjemmeside, og Carola Clean Air reagerede ikke på telefoniske eller skriftlige henvendelser. Schröder oplyste om et produkt "Future Emission Control" med nøgletal, der er sammenligne-lige med de øvrige filterprodukter. Produktdata var dog foreløbige, og produktet kunne ikke fin-des på markedet endnu.

Så vidt det kunne vurderes fra de tilgængelige oplysninger, minder teknologien i de forskellige ESP'er meget om hinanden. Dette afspejles også i, at salgspriser for elektrofiltre ligger på tilnærmelsesvis samme niveau på ca. 2.000-2.500 EUR excl montering og moms. Exodrafts ESP 10 filter har en vejledende udsalgspris på 14.000 kr. inkl. dansk moms.



Airjekt 1



ÖkoTube Outside



Schröder FEC



FIGUR 2. Afbildning af udvalgte filtre som vurderes egnede til brug sammen med brændeovne.

3.2 Markedsudvikling

Der blev igangsat en del udviklingsprojekter før og efter 2010, da den Tyske BImSch V [2] forordning trådte i kraft. Dengang havde industrien en formodning om, at der ville opstå et betydeligt marked for eftermonterbare partikelfiltre, i takt med at de forskellige alderskategorier af fastbrændselskedler og brændeovne blev omfattet af krav om feltmåling. Der er installeret cirka 11 millioner brændeovne og anslået ca. 1 million fastbrændselskedler i beboelser i Tyskland. I 2018 udførte de tyske skorstensfejere 32 millioner feltmålinger på automatiske oliefyre, gasfyre og fastbrændselskedler. Det vil være problematisk, hvis yderligere 11 millioner portionsfyrede brændeovne skulle tjekkes årligt. Modsat de automatiske kedler, kræves det at nogen skal blive hjemme for at fyre i brændeovnen, hvis der skal måles emissioner på den. Der skal også etableres en slags måleåbning i skorstenen. Det er nemmere at kontrollere automatiske fyringsanlæg, der kører kontinuerligt, og hvor målingen formentlig kan udføres udefra gennem en måleåbning i skorstenen. Det er forklaringen på, at de 32 mio. feltmålinger er mulige at udføre. Derfor overvejede UBA i 2020 [12] forskellige tilbagefaldsoptioner, det kunne være forlængelse af intervallerne til kun to kontrolmålinger hvert 7. år dvs synkroniseret med skorstensfejrning. En anden mulighed var at fravælgepartikelmålinger og nøjes med at måle emission af kulilte (CO). I øjeblikket forlyder det fra kilder i branchen, at kontrollen af brændeovne bliver begrænset til en dokumentkontrol baseret på resultaterne af typeprøven. Idet BImSch V [2] trin 2 grænseværdi fra 2015 for brændeovnes partikelemission er på 40 mg/Nm³, vurderes det, at der kun vil være et mindre antal brændeovne ældre end 2010, der ikke kan løfte dokumentationen på baggrund af værdien i prøvningsrapporten, og derfor forholdsvis få brændeovne, der vil være i målgruppen til at få eftermonteret et partikelfilter. Af disse årsager, altså hvorvidt ovnen er nyere end 2010 eller fordi partikelemissionen i prøvningsrapporten er under 40 mg/Nm³, er der ikke opstået det marked for eftermonterbare filterløsninger til brændeovne,

der ellers var udsigt til omkring 2010. Markedet for partikelfiltre findes blandt de større og dyrere kedelanlæg, hvor det godt kan svare sig at investere i størrelsesordenen ca. 20.000-25.000 kr. plus installationsomkostninger for en filterløsning, fremfor at blive tvunget til at udskifte kedlen. Til den pris kan den gamle brændeovn udskiftes med en ny, og dermed være fri for krav om feltmåling. De seneste år er der kommet et nyt filter på markedet, filtret Future Emission Control fra Schröder. Det kunne godt tyde på, at udvikling og brug af partikelfiltre har fået fornyet opmærksomhed, formentlig både på grund af debatten om partikelforurening, øget miljøbevidsthed generelt, og i lyset af Blauer Engel miljømærket for brændeovne.

Efter BlmSch V forordningen fra 2010 [2] skulle kedler og brændeovne kontrolleres ved feltmåling trinvis efter alder, således:

- kedler fra før 1995 skulle kontrolleres fra 2015,
- kedler fra 1995-2004 skulle kontrolleres fra 2019
- kedler fra 2005-2010 skal kontrolleres fra 2025
- brændeovne fra før 1974 kontrolleres fra 2015
- brændeovne fra 1975-1984 skulle kontrolleres fra 2018
- brændeovne fra 1985-1994 skulle kontrolleres fra 2021
- brændeovne fra 1995-2010 skal kontrolleres fra 2025

Kedler og brændeovne nyere end 2010 kræves ikke kontrolleret, da de er bragt på markedet efter ikrafttræden af BlmSch V forordningen. Forordningen tilbyder ingen forklaring på, hvorfor alderskategorierne og kontrolterminerne af kedler og brændeovne ikke er synkroniserede. En mulig forklaring kan være at brændeovne tilskrives en længere levetid end kedler. En kedel har jo en vandkreds, og er derfor potentiel mere udsat for tæring og termisk stress, end en 'tør' brændeovn er.

Hvis en ovn eller en kedel ved feltmåling fik målt over 150 mg/Nm³ i partikelemission, giver distriktskorstensfejeren skriftligt påbud til borgeren om inden 30 dage at nedbringe partikelemissionen til under grænseværdien for feltmåling. Det er alene op til borgeren om anlægget skal renoveres, nedtages eller forsynes med et eftermonterbart partikelfilter. (kilde: Industrieverband Haus-, Heiz und Küchentechnik – HKI) Ud over partikelemission, som det primære kontrolparameter, findes der også en grænseværdi for CO emission på 4000 mg/Nm³ for brændeovne. Det er til sammenligning knap tre gange ecodesign grænseværdien på 1500 mg/Nm³. Tilsvarende er grænseværdien for partikelemission på 150 mg/Nm³ knap fire gange ecodesign grænseværdien på 40 mg/Nm³, således der tilskrives en margin for at opveje, at emissionsegenskaberne i daglig drift formodes dårligere end dem, det blev præsteret under typeprøven, eller fordi en skorstensfejers feltmålingsudstyr ikke er af samme standard som laboratorieinstrumenter.

3.3 Delkonklusioner, markedsoversigt

Det er meget tydeligt, at både fremstilling og brug af partikelfiltre har været domineret af Tyskland og Schweiz. Det skyldes ikke mindst indførelsen af den tyske BlmSch V forordning fra 2010, der både indførte grænseværdier for godkendelse af nye ovne og kedler, samt krav om regelmæssig feltmåling af installerede kedlers emissioner. Desuden er egne i bjergene særligt udsatte for opkoncentrering af luftforurening under inversionsforhold eller fravær af blæsevej om vinteren. Der fremgik en opblomstring af filterfabrikanter og modeller i årene omkring 2010, og i løbet af de seneste par år, er der også begyndt at komme nye filtre på markedet. I den mellemliggende periode er der dog sket en konsolidering blandt fabrikanterne, hvor nogle modeller har vist sig at være mere efterspurgt end andre. Der har også været enkelte produkter i Norge og Sverige, men ikke nogen, der har udviklet sig eller er holdt ved i noget omfang. Senest er der i Danmark blevet arbejdet med et-to elektrofiltre. Det ene, der er kommet på markedet, (ESP10) indeholder en lovende løsning, der kombinerer en røgsuger med et elektrofilter, og har som et af de få kendte også en effektiv selvrensingsmekanisme. Det andet filter er

af Teknologisk Institut bekendt stadig under udvikling eller produktmodning. Dette filter findes nærmere beskrevet i kapitlet Kritisk volumen, side 57. Filtrene fra Tyskland og Schweiz er primært udviklet til kedler, og det er tilmed der, at de bliver anvendt mest i dag. Dog er en lille håndfuld også anvendelige til brændeovne. Deres største ulempe er krav om hyppig manuel rensning.

4. Delopgave 3 Filtres dokumenterede effekt

Opgaveformulering: "Der ønskes en ajourført oversigt over forskellige filter nuværende, potentielle og dokumenterede partikelreducerende effekt, både ift. fine partikler (PM_{2,5}) og ultra-fine partikler (PM_{0,1}).

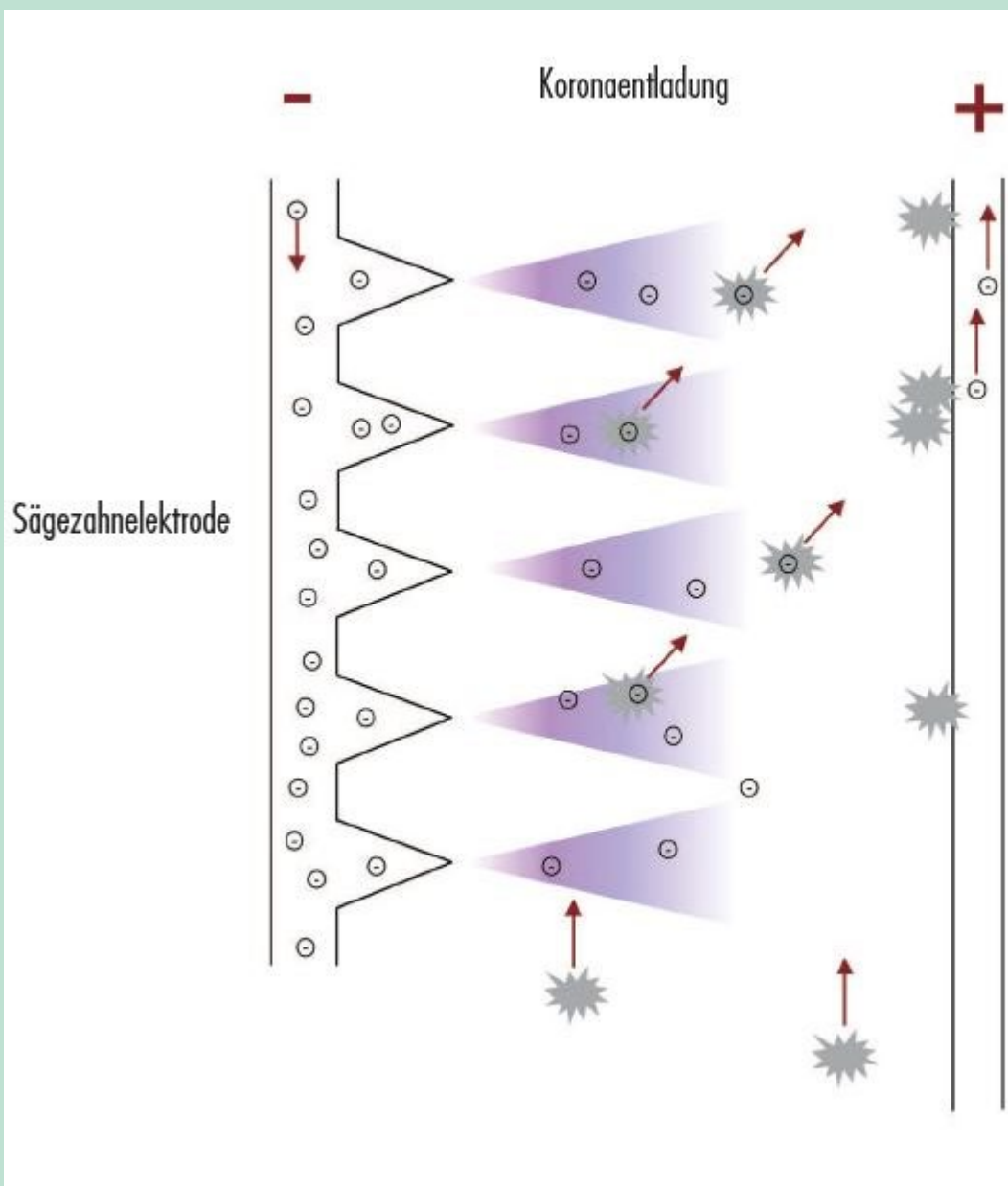
Er der på nuværende tidspunkt tilstrækkelige måledata og samlet grundlag for at vurdere, at partikeleffekten ved at installere filter på en gammel brændeovn (skorsten), vil være mindst den samme som ved udskiftning til ny brændeovn? Det kan belyses, om der er forskellige reduktionspotentialer ved filterløsning, afhængig af brændeovnens nuværende emissionsprofil."

4.1 Filtrets virkemåde

ESP står for det engelsk udtryk *electrostatic precipitator* eller på dansk *elektrostatisk filter*.

ESP'er blev første gang brugt i 1824, men blev først kommercialiseret i begyndelsen af 1900-tallet, hvorfor teknologien ikke er ny. I brændeovnsbranchen har ESP'er været en del af rensningsteknologien benyttet en rum tid. Dog har denne teknologi anvendt i brændeovnsrøg udfordret af forskellige forhold, som vi vil komme nærmere ind på i denne gennemgang.

Den typiske virkemåde for et elektrofilter er, at partiklerne i røggassen udsættes for et kraftigt elektrisk felt. En elektrode lodret placeret midt i røggasflowet påtrykkes en høj elektrisk spænding. Derved opstår der et kraftigt elektrisk felt mellem elektroden og modpolen, der kan udgøres af skorstensvæggen eller et tilhørende metalgitter. Når primærpartikler nærmer sig den ioniserede luft i feltet, bliver disse også ioniseret, og modtager derved en elektrisk ladning. Når partiklerne er ladet, tiltrækkes de af modpolen. Når partiklerne bliver tiltrukket af modpolen, begynder de at agglomerere (sammenklumpes), og ender med at blive ophobet på modpolens overflade. På grund af ophobningen af partikelmasse kræves regelmæssig rengøring af især modpolen for, at filtret bevarer dets effektivitet.



FIGUR 3. ESP princippet belyst ved Airjekt 1 filtret. Bemærk elektroden på dette filter er savtakket, hvilket bevirker koncentration af feltet ud for spidserne. Andre filtre har cylindriske, rektangulære eller trådformede elektroder.

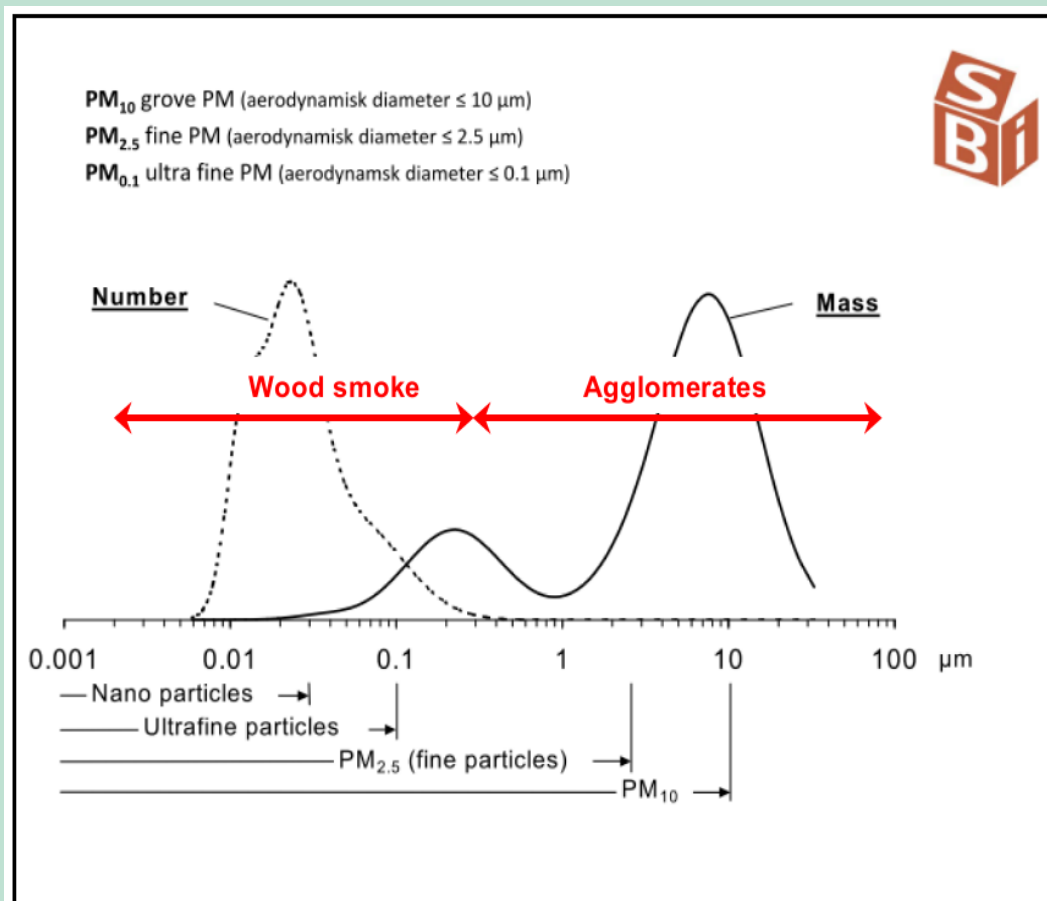
Ved fortsat ophobning af partiklerne kan der, hvis ikke laget af partikelmasse fjernes regelmæssigt, opstå delvis tilstopning af røgevejen, spændingsoverslag mellem elektrode og modpol og eventuelt skorstensbrand. Filtrets effektivitet er påvirket af flere faktorer. Der skal være et rimeligt forhold mellem elektrodens længde og røgens flowhastighed. Hvis et fyringsanlæg producerer store mængder røg, kræves en længere elektrode for at sikre tilstrækkelig ionisering af partiklerne. Hvis røggassen er forholdsvis tør, og partiklerne primært består af støv og sod, som fra en pillekedel, er den ophobede partikelmasse lettere at fjerne fra modpolen. Omvendt står det til, hvis der er tale om en brændeovn, hvor brændet er middelfugtigt eller fugtigt. I disse tilfælde indeholder røgen en del organiske forbindelser, der risikerer at danne belægninger indvendig i filtret, som er vanskeligere at slå af. Jo fugtigere røggassen er, jo lettere opstår der elektrisk overslag mellem elektrode og modpol. Under et overslag kolliderer det elektriske felt forbigående og filtret har ringe eller ingen effektivitet kortvarigt. Hvis røggassen har

et højt indhold af Black Carbon (sod), sænkes tærsklen ligeledes for elektrisk overslag. Blandt de undersøgte filtre, beregnet til brændeovne, varierer elektroden længde fra ca. 30 - 150 cm.

ESP10 filtret har en bankemekanisme, der ryster modpolen (meshet). Ved bankning og rystebevægelser løsnes den ophobede partikelmasse fra modpolen. Det meste falder til bunds, men flager eller mindre fragmenter kan godt føre ovenud med røggasstrømmen. Dette beskrives som medrivning. Medrivning kan være én mulig forklaring på, at der i nogle tilfælde kan måles et højere partikelantal efter filtret end før. Elektroden kræver mindre rensning end modpolen. Det skyldes dels at den har et begrænset tværsnitsareal og overflade, hvortil den dermed kan binde mindre partikelmasse og lagtykkelse end modpolen. Samtidig får det elektriske felt de ioniserede partikler til at bevæge sig i en retning væk fra elektroden og ud mod modpolen. For brændeovne, der har høje koncentrationer af organiske forbindelser i røggassen eller hvor røggassen har et højt fugtindhold, kan der dog dannes en klæbrig tjæreagtig belægning på elektroden. For at fjerne denne belægning kræves der i reglen manuel rensning. Krav om rensningshyppighed vil være afhængig af fyringsanlæggets forbrændingskvalitet og dermed indirekte også dets alder. Læs mere om rensning i afsnit 7.

4.2 Reduktion af partikelmasse, PM, og partikelantal, Pn.

ESP-teknologien er udelukkende en rensningsteknologi, som fjerner partikler (aerosoler). Gasser, der ikke er nået at kondensere endnu, bliver ikke berørt af denne ionisering, hvorfor gasser uantastet passerer spændingsfeltet. Teknologien er meget effektiv for de fine og ultrafine partikler, hvorfor det er alment kendt at teknologien er højeffektiv vedr. reduktion af disse partikler og ligeledes partikelantal. Disse ultrafine partikler har næsten ingen masse, som illustreret i figur 4 herunder. Figuren viser en typisk fordeling, men antals- og massefordelingsprofilen kan godt variere en del fra ovn til ovn. Dette er igen afhængig af det anvendte brændsel, samt af det enkelte filters virkemåde. Derfor er der ikke en lineær sammenhæng mellem et filters massereduktion og antalsreduktion. Antalsreduktion er gerne højere end massereduktionen, som det er illustreret i figurer 5 og 6.



FIGUR 4. Principskitse, typisk fordeling af masse og antal
 (kilde: statens byggeforskningsinstitut).

Effekten af filtrene kan måles med mange forskellige typer af instrumenter afhængig af, hvor fintfølede instrumentet er, hvor der måles, hvilke procedurer, der følges, og om det omhandler partikelmasse, PM, eller partikelantal, Pn.

Fokuseres der først på partikelmasse, kan denne måles både i den varme ufortyndede røggas eller i en koldere og fortyndet røggas. Både temperatur- og koncentrationsmæssigt giver det to meget forskellige miljøer, som egner sig til forskellige måleinstrumenter. I den ufortyndede røggas måles normalt både gasser og partikler på støvform udledt fra forbrændingen. Partiklerne i den ufortyndede røggas måles ved at opsamle partiklerne på filter. Håndteringen af disse filtre står beskrevet i standarderne, der følges, hvorefter massen opsamlet bestemmes ved en relativ simpel før og efter vejning af filtret, og efterkorrigeres med blindfilteranalyse. Denne metode kaldes en gravimetrisk partikelopsamling, og er mest kendt som metoden benyttet under typeprøver. Partiklerne på støvform angives derefter i mg/nm³, og typisk henført til 10 eller 13% ilt afhængig af udledningskilde (biomassekedler 10%, brændeovne 13%). Udsugningen på filtre skal ske isokinetisk, hvilket vil sige, at der bliver udsuget røggas vha. en probe med samme hastighed som røggassen, der passerer proben. Dermed sikres den naturlige opblanding af partikelstørrelser, end hvis der enten bliver suget for hurtigt eller for langsomt igennem proben. Går man skridtet videre kan man lave en online partikelmåling. Prøven kan udtages på forskellige måder. Én måde kan være at opsamle røggas via et instrument med et internt filter, som løbende bliver vejret f.eks. Wöhler SM500. Alternativt ved brug af et instrument, der kan detektere en størrelsesfraktion, for til sidst at summere fraktionerne sammen til en masse over den udsugede periode f.eks. DustTrack. Sidstnævnte instrument ligger i den dyre ende af instrumenterne af denne type, og kan opdele samlingen i fraktionerne PM₁, PM_{2.5},

PM₄, PM₁₀ og PM_{total} modsat førstnævnte, som kun kan give en PM_{total} værdi, som dog kan vise den løbende ophobning på filteret visuelt. For at instrumentet har en længere levetid kan det kræves, at samlingen fortyndes inden den kommer ind i selve instrumentet, hvorefter der efterkorrigeres for fortyndingen efter endt måling.

Måling af partikelmasse med begge instrumenter over samme periode kan variere. Dels fordi der er tale om to forskellige instrumenter, men også fordi den ene udtager faktisk opsamlet støv i skorstenen på et filter, mens den anden løbende antager en vægt ud fra den detekterede partikelstørrelse. For afprøvning af produkter efter den norske standard (ref. NS3058/-59) bliver partikler opsamlet i en fortyndet røggas med opblanding omkring 20-30 gange, hvilket betyder at gasser, f.eks. VOC'er udledt fra forbrændingen, modsat den ufortyndede røggas, har mulighed for at kondensere og vokse i størrelse. Dermed er der også mulighed for at stige i vægt og således kan det blive opsamlet på planfiltret. Dette betyder, at flere partikler når at blive opsamlet ved den norske metode end ved Heated Filter-metoden. Derfor er der opstået en konflikt mellem tilhængere af Heated Filter metoden og den norske metode, der hver især hævder, at den foretrukne metode er den 'bedste'.

Partikelmasse målt i hhv. fortyndet eller ufortyndet røggas kan derfor ikke direkte sammenlignes, når det handler om effekten af en ESP, da ESP'en, som nævnt, er højeffektiv ift. reduktion af fine og ultra-fine partikler. Massen fra disse er, som nævnt, meget begrænset i forhold til de tungere kondenserede partikler, der er til stede i den fortyndede røggas. Der er flere eksempler i litteraturen, som konstaterer, at ESP'en fjerner partikler, herunder sod, (Black Carbon), hvorfor før og efter målinger af ESP'ers effekt i den fortyndede røggas giver en stor forskel i reduktion af sodpartikler, men kun en mindre effekt på partikelmassen.

Angående måling af partikelantal benyttes instrumenter, som økonomisk kan være en helt anden liga end måling af partikelmasse, hvilket, sammen med fravær af myndighedskrav, har betydning for mængden af tilgængelige historiske data på dette område. Også ved måling af partikelantal er det nødvendigt at røggassen bliver fortyndet, før der analyseres på røggassen. SMPS (scanning mobility particle sizer) og AVL kan være eksempler på instrumenter, som tæller partikler helt ned til få nm i størrelse og angiver antallet som #/cm³. Det er dog forskelligt fra instrument til instrument, hvilket range instrumentet kan gå ned til, og dermed også antallet af partikler, som det kan detektere i det meget lave område. Et eksempel kan være instrumentet TSI NanoScan SMPS 3910, som først ved hjælp af en intern cyklon frasorterer de store partikler, for herefter at registrerer partikelantallet helt ned i størrelsen fra 10nm op til 420nm. For AVL Particle Counter kan instrumentet registrere antal i måleområdet 23nm til 2,5µm, altså et noget større måleområde end SMPS-instrumentet.

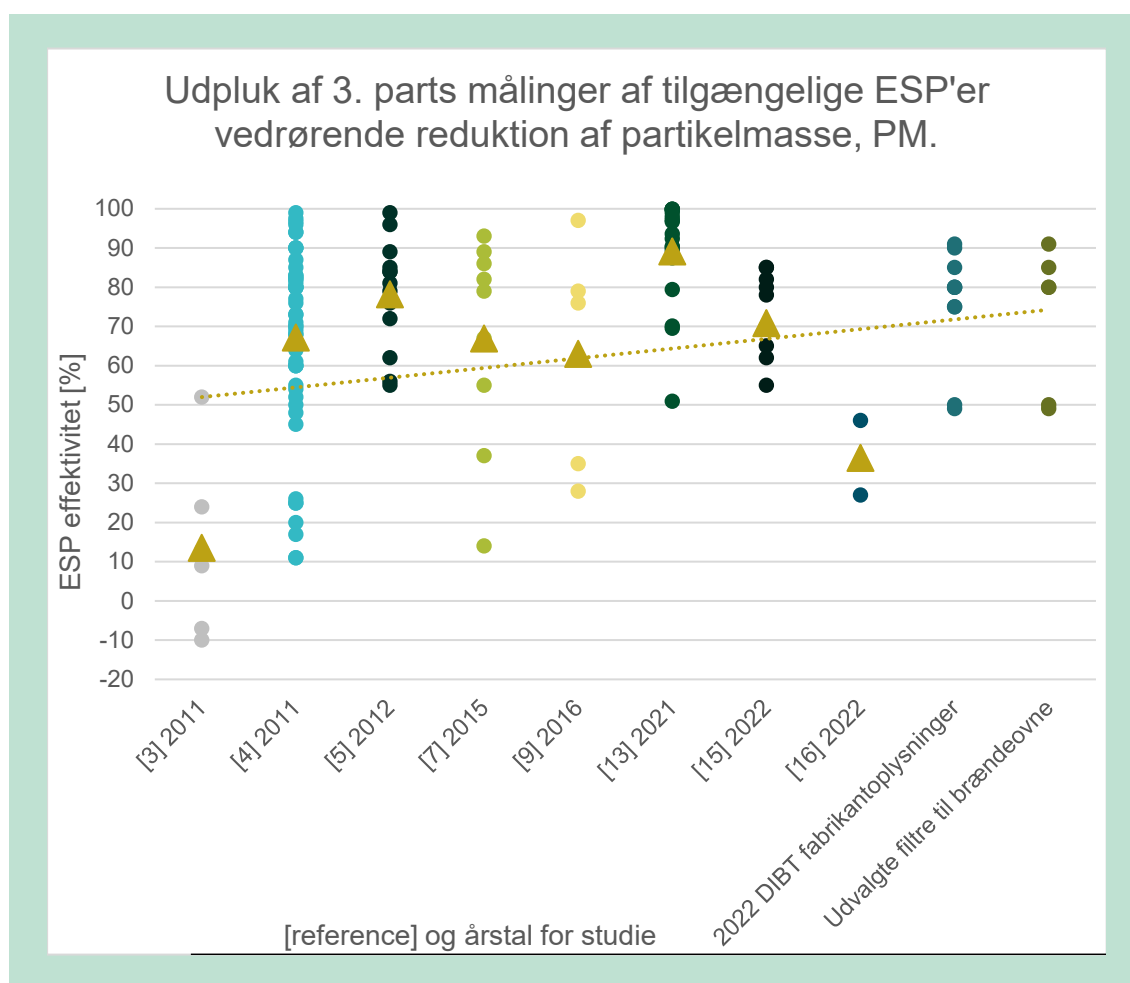
Partikelantalsbestemmelse er ikke noget, som er obligatorisk ved nuværende brændeovnstest, som det er i bilindustrien. Dog opkræves målinger for den nyligt oprettede frivillige tyske mærkningsordning for brændeovne Blauer Engel [11]. Her kræves partikelantal målt samtidig med bestemmelse af de øvrige emissionskomponenter under prøven. Til Blauer Engel godkendelser stilles krav om måling af partikelantal fra størrelsen 23nm til 1 µm (mikrometer dvs PM₁). Instrumentet, som benyttes på Teknologisk Institut til denne type prøve, er af typen AVL Condensing Particle Counter (CPC)

4.3 Historisk gennemgang af 3. partsmålinger fra diverse studier fra de seneste 11år.

I litteraturen findes en del historiske data for tilgængelige filteres målte effektivitet. Dog er data ikke begrænset til udelukkende brændeovne, men vedrører også biomassefyret kedler, som kan være både automatisk fyret med træpiller eller ældre portionsfyrede brændekedler. Ikke alene er kilderne forskellige, der er også blandet data for både partikelmasse opsamlet i den varme røggas samt partikelmasse opsamlet i fortyndingstunnel, hvilket giver blandede resultater lige fra høj til lav effektivitet. Ydermere findes både målinger foretaget i laboratorie og i felten, inklusiv de udfordringer, der er vedr. opstilling og udstyr for målinger i felten.

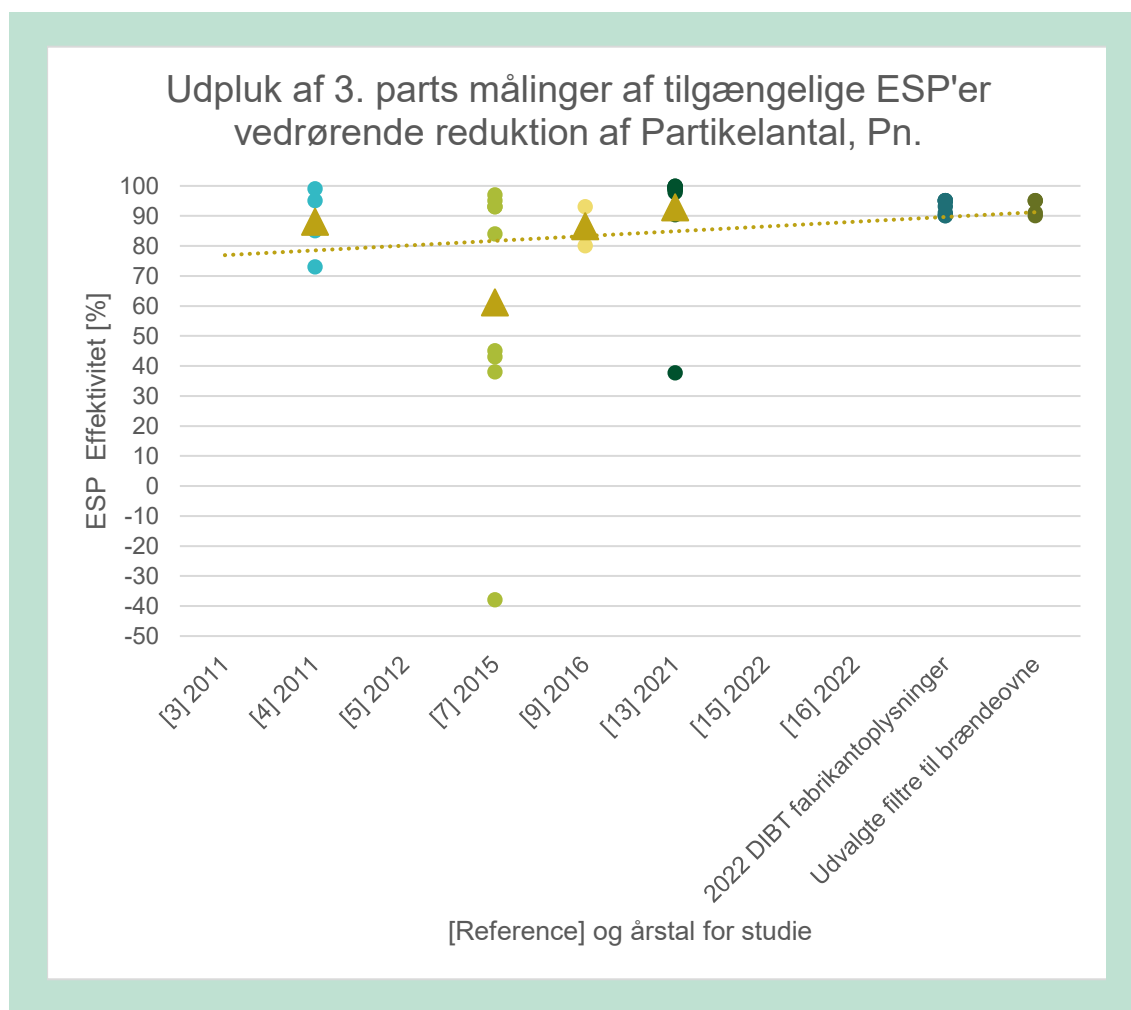
Herunder er data medtaget for et udpluk af den tilgængelige litteratur for otte studier fra 2011 til 2022 vedrørende ESP'ers evne til ikke kun at reducere partikelmasse men også partikelantal. Som det tydeligt kan ses på figur 6, er der ikke nær så mange partikelantalsmålinger, som der er partikelmassemålinger, hvilket er afbilledet på figur 5. Dette kan som tidligere nævnt hænge sammen med fravær af myndighedskrav og begrænset adgang til måleinstrumenter på det pågældende tidspunkt, samt instrumenternes anskaffelsesomkostninger. Som eksempel kan anskaffelse af AVL-instrumentet løbe op i omegnen af 1 million kr., som kun er økonomisk muligt i universitetsmiljøet og blandt de større måleinstitutioner. Afsnittet er en ultrakort gennemgang af de otte studiers resultater og delvise konklusioner. Fælles for studierne er, at ingen af dem differentierer mellem PM_{total} eller $PM_{2.5}$. Årstallet på X-aksen for de to figurer repræsenterer hvert studie sammenholdt op imod de tilgængelige relevante ESP-filtre, der er DIBT-godkendte i 2022 for biomassefyrede anlæg. Af dem er der udvalgt fem filtre, som er vurderet relevante til brug sammen med brændeovne. Se afsnit 4 filteres dokumenterede effekt. Studierne, der er udvalgt, overlapper delvis filtregennemgangen behandlet under markedsoversigten i afsnit 3.

Ligesom med reduktionen af partikelmasse og partikelantal ses der også over tid en stigende tendens for effektiviteten i de nyere undersøgelser, hvilket siger noget om udviklingen af produkterne som helhed. Dog, som gennemgangen i afsnit 3 antyder, kan konsolideringen af antallet af både filtre og fabrikanter hænge sammen med at efterspørgsel efter filtre har været begrænset (til de større og dyrere kedelanlæg), hvorfor antallet af filterfabrikanter ikke er steget, og der således kun er set begrænset introduktion af nye filtre på markedet de seneste år.



FIGUR 5. Udpluk af 3.parts målinger over tilgængelige ESP'ers effektivitet vedrørende partikelmasse, PM, samt gennemsnitsværdiernes tendenslinje fra 2011 til 2022 holdt op imod

DIBT-godkendte ESP filteres op effektivitet, der er baseret på målinger udført af en uafhængigt test institut.



FIGUR 6. Udpluk af 3.parts målinger over tilgængelige ESP'ers effektivitet vedrørende partikelantal, Pn, samt gennemsnitsværdiernes tendenslinje fra 2011 til 2022 målt op imod DIBT-godkendte ESP filteres selvdeklarerede effektivitet.

([3] 2011) ESP teknologien i studie vedrørende tre filtre viser, at der ikke er nogen signifikant reduktion på total PM masse, men nogen reducerende effekt på sodpartikler. Sidstnævnte er observeret ud fra røgfanen og ud fra det visuelle resultat fra den opsamlede partikelmasse på filtre. Frasorteringen af sodpartiklerne kan dog ikke detekteres tilstrækkeligt på den opsamlede masse, da massen er opsamlet i fortyndingstunnel, hvor de kondenserbare VOC'er vægtmæssigt fylder mest. Ingen af de testede teknologier har haft en reducerende effekt på reduktion af antal. Tværtimod har resultaterne vist en øgning af de ultrafine partikler, $<0,1\mu\text{m}$, hvilket både er observeret i felten og i laboratorie. Spredningen for partikelmassereduktion er fra -10% til 52% målt udelukkende i fortyndingstunnel.

([4] 2011). En meget stor samlet undersøgelse af 12 forskellige studier omkring ESP'er målt i både laboratorier og i felten. Datamængden i denne rapport er enorm, og dækker helt fra enkelte målinger til målinger foretaget i op til 61 døgn og dermed tusindvis af timer. Studierne er en stor blanding af målinger udført på forskellige kilder, i forskellige miljøer og på forskellige brændsler målt efter forskellige metoder. Datamængden plottet i figurerne er derfor kun udpluk fra datamængden for at vise spredningen for den tilgængelige teknologi på dette pågældende tidspunkt. Spredningen for de udvalgte data for partikelmassereduktion er fra 11 til 99% målt

både i varm og kold røggas, samt enkelte målinger for reduktion af partikelantal mellem 73 til 99%.

([5] 2012) Et felt- og laboratoriestudie af målt partikelmasse fra Schweiz direkte i røggassen udført på tre forskellige kilder. Resultaterne viser høj virkningsgrad målt på både brændekegel og -ovn, men i særdeleshed på en pilleovn målt over en periode på ca. tre måneder i laboratorie. Spredningen for dette studie for partikelmassereduktion er fra 55 til 99% målt både i varm og kold røggas.

([7] 2015) Tre forskellige ESP'er er undersøgt i et mindre studie med forskellige teknologier målt på den samme brændeovn under kontrollerede laboratorieforhold. Der er stor spredning på effektiviteten af PM-reduktion afhængig af indbygget teknologi, men ditto evnen til at reducere antal. Bedste teknologi i studiet viser en PM reduktion på >80% samt en Pn reduktion >95%, men det mindst reducerende filter reducerer hhv. >39% og >17%. Spredningen for den udvalgte data for partikelmassereduktion er fra 14% til 92% målt primært i varm røggas, samt enkelte målinger for reduktion af partikelantal mellem -38% til 97%.

([9] 2016) En målekampagne er foretaget på brændeovn med og uden aktiveret ESP, hvor der er målt kondenseret PM masse i fortyndingstunnel, løbende PM i varm røggas med Dusttrack samt fine sodpartikler, Black Carbon, i den kondenserede røggas. Målingerne er foretaget på ét filter i to forskellige laboratorier. Målinger i det ene laboratorium viser en tydelig reduktion på de fine sodpartikler på op imod 97%, mens den samlede reducerede PM-masse, har en knap så høj reduktion på kun 40%. Reduktion af de fine sodpartikler understøttes af fjernelse af de målte partikelantal på op imod 80%. I det andet laboratorium er der konstateret tilsvarende reduktioner på hhv. 76%, 35% og 93% for PM med Dusttrack, PM i fortyndingsrune samt partikelantal. Sodpartikler er ikke målt i laboratorium 2. Spredningen for de udvalgte data for partikelmassereduktion er fra 28% til 97% målt for både varm og kold røggas, samt enkelte målinger for reduktion af partikelantal mellem 80 til 97%.

([13] 2021) Udviklingsprojekt vedrørende udvikling af ESP målrettet biomassekedler under 25kW. Målinger i laboratorium på forskellige kedler viser meget høj effektivitet >95%, både for gravimetrisk støvpartikler samt for de fine sodpartikler, Black Carbon, som understøttes af meget høj effektivitet for reduktion af partikelantal op imod >99%. Målinger viser også ESP'ens langtidsvirkning, da filteret er påsat en kedel i felten over en 3,5 måneders periode. Reduktionen er her faldet fra 94% til 70% for partikelmassen, fra 88% til 51% for Black Carbon og fra 90% til 38% for partikelantal. Dette fald viser en tydelig sammenhæng mellem rensningsintervaller og effekt. I takt med tilslodning uden korrekt rensningsintervaller falder effektivitet betragteligt. I dette tilfælde er rensningsintervaller hos den private ændret fra hver 8. time til ca. én gang i døgnet grundet støjgener ved automatisk rensning. Spredningen for de udvalgte data for partikelmassereduktion er fra 51% til 99,9% målt i varm røggas, samt målinger for reduktion af partikelantal mellem 38% til 99,9%.

[15] Et stort feltstudie af 30 installerede anlæg i Schweiz på forskellige fyringsanlæg inkl. brændekegel, brændeovne, masseovne og åbne pejse. Målinger er foretaget over en længere periode fra november til maj, og viser en gennemsnitlig virkningsgrad på ca. 70% for de målte anlæg. De konkluderer i studiet at ESP'erne sikrer stabil drift og god adskillelsesgrad, som sikrer mere rent miljø i Sass-Fee, hvorfor tilskudsordningen i området bør fortsætte. Spredningen for de udvalgte data for en partikelmassereduktion på 37% til 90%, er kun i den varme røggas i felten.

([16] 2022) Feltmålinger foretaget i skorstene før og efter installationer hos private husstande i større demonstrations- og udviklingsprojekt omhandlende et helt villakvarter om forskellige virkemåder til at nedbringe emissioner fra brændeovne for nærmiljøet. To enheder af samme type er installeret i husstandene, og der er målt før og efter filteret, er monteret. Eftermålinger er foretaget en rum tid efter installationen (ca. 6 måneder), hvilket kan forklare, hvorfor effektiviteten for partikelmasse i gennemsnit er omkring 37% og dermed en del lavere end forventet. Spredningen for de udvalgte data for partikelmassereduktion er fra 27% til 46% målt i den varme røggas.

4.4 Målinger og metode til bestemmelse af effektivitet

Måden at bestemme effektiviteten af et ESP-filter kan derfor gøres på forskellige måder. Den mest præcise metode vil være at lave en partikelopsamling – altså partikelmasse - eller analyse både før og efter et aktiveret partikelfilter uden at røggassen undervejs bliver fortyndet. Er der indbygget fortynding i filteret, skal der tilmed laves reference CO₂-målinger både før og efter filteret. Dermed fås der to forskellige partikelmassekoncentrationer målt over samme periode, hvor filterets effektivitet relativt simpelt kan beregnes for støvpartikler opsamlet i den varme røggas. Fyringsproceduren for testen kan fint følge den gældende procedure EN13240 eller den kommende EN16510. Skal der opsamles partikelmasse i den kolde røggas efter den norske metode i fortyndingstunnel (Ref NS3058), vil det kræve at man laver en eller flere fyringer med filteret inaktiv eller helt afmonteret, hvorefter en identisk fyringsprocedure udføres med filteret aktiveret. Denne før og efter metode i den kolde røggas har større usikkerheder, da den udføres på to forskellige fyringssekvenser frem for direkte på den samme fyringssekvens. Jo flere fyringer for hver situation, jo mindre er usikkerhederne. Desuden vil denne metode, som tidligere nævnt, have en mindre effektivitet, da filtrets effekt påvirker de små og meget lette partikler, og ikke de kondenserede og tunge partikler i den fortyndede røggas. Partikelantal kan ligeledes måles både før og efter filtret i den varme røggas, men dette stiller store krav til testinstituttet, da det kræver to sæt udstyr for måling af effektiviteten. Alternativet kan være 1) kun én måling efter filtret eller 2) måling med og uden filter som for opsamling i fortyndingstunnelen. Ulempen ved at lave før og efter målinger som tidligere omtalt for begge eksempler overfor er, at det er et øjebliksbillede, hvor filtret (formentlig) er nyt og rent. Der er mange eksempler i litteraturen, der antyder, at filtrets effektivitet aftager i takt med, at ophobningen af partiklerne på både elektrode og modpol vokser [SHREK 2021, Force 2011, IEA 2011, CAT 2022]. Altså vil det være nødvendigt at rengøre hyppigt for at sikre den fortsatte høje effektivitet, se desuden afsnit 7, model for rensning og vedligehold.

Skal der udvikles en måleprocedure til bestemmelse af filtres effektivitet bør metoden derfor afspejle de to situationer og dermed spredningen af filterets effektivitet. Det kan f.eks. gøres ved at producenter får testet filteret efter en valgt procedure fra ny, og gentestes efter en dokumenteret ibrugtagningsperiode, som det er tilfældet for både NS3058 og EPA, hvor ovne kræves ældet ved fyring i mindst 50 timers brug inden prøven. Gentesten kan afhænge af, hvor ofte fabrikanten anbefaler at lade filteret rengøres f.eks. hver 2., 3. eller 6. måned eller ved selvrensning pr. x antal timer.

Uanset hvilken opsamlingsmetode, der skal benyttes, eller hvilken fyringsprocedure testen skal foregå efter, vil det kræve et omfattende måleprogram, som kan dokumentere proceduren og dermed filtres effektivitet. De mange studiers målinger ovenfor beror på vidt forskellige metoder og procedurer, hvorfor disse kun kan bruges til en vejledende sammenligning mellem de historiske målinger og de rapporterede målte effektivitet.

4.5 Delkonklusioner, filtres dokumenterede effektivitet

På DiBts oversigt over godkendte partikelfiltre oplyses effektiviteten for partikelmassereduktion. Oplysningerne baserer sig på fabrikanternes viden på baggrund af målinger udført af et testinstitut, idet DiBt ikke kontrollerer effektiviteten. De oplyste værdier svinger mellem 50-90% for partikelmasse. Dermed ned til og med de fine partikler (PM 1). Flere typer af filtre er blevet målt i forskellige projektsammenhænge, og der findes uafhængige rapporter med oplysninger om målt effektivitet. Fælles for både fabrikanternes oplysninger og for rapporterne gælder det, at de udførte målinger enten har været øjebliksmålinger eller målekampanjer af kortere varighed. Da et elektrofiltres effektivitet i høj grad er påvirket af det pågældende fyringsanlægs forbrændingskvalitet og af rensintervallerne, kan man ikke nødvendigvis tage de oplyste værdier for effektivitet som konstante over tid. Der findes også videnskabelige rapporter der beskæftiger sig med partikelfiltrenes effektivitet overfor de ultrafine partikler (PM 0,1 og derunder), hvor effektiviteten er udtrykt som reduktion af partikelantal. Det kan dog være vanskeligt at sammenligne disse oplysninger, da resultaterne er påvirkede af valg af måleinstrument, kontrol af fortynding, og røggassammensætning i den rå gas.

Der tegner sig dog et billede af at partikelfiltrene yder højere reduktion af partikelantal (90-95%) end af massereduktion (50-70%).

5. Delopgave 4 Krav og kriterier i nabolandene og i miljømærker

Opgaveformulering:

"Der ønskes en oversigt og analyse af regulering og miljømærkekriterier, der direkte eller indirekte er med til at sætte rammer for brug og markedsføring af filtre til brændeovne og brænde-kedler i andre lande. Særlige fokuslande er Tyskland, Østrig og Schweiz, men også Norge og Sverige, der generelt har miljøstandarder, der svarer til de danske, samtidigt med, at de har en lang tradition for brug af forskellige typer brænde til opvarmning"

5.1 Lovgivning og krav

Siden 2022 har alle medlemslandene haft ensartede standarder for emissioner fra brænde-ovne og siden 2020 for kedler, i kraft af de fælles Europæiske ecodesign forordninger 1185 (brændeovne) og 1189 (kedler). I det efterfølgende behandles alene krav til brændeovnes emissioner, der alle er opgjort efter masse, f.eks. maksimalt 40 mg/Nm³ for partikelemission fra brændeovne.

For nogle lande som Danmark, Belgien og Tyskland har ecodesign kravene været omtrent på niveau med de tidligere nationale krav. For hovedparten af medlemslandene repræsenteret udgør ecodesign kravene et fremskridt, og for særligt landene i Øst- og Centraleuropa, der slet ingen krav havde tidligere, er de et stort fremskridt. Ecodesign har uden tvivl haft positiv af-smittende virkning for Danmark, da vi modtager en del grænseoverskridende luftforurening nede fra Europa.

Vi finder det derfor nyttigt for historikken at starte med et tilbageblik på de nationale krav til brændeovnes emissioner fra før 2022.

- Danmark: nationale krav siden 2008, senest med grænseværdier for både partikler og OGC i kraft af Bek 49 fra 2018
- Norge: Nationale krav til partikeludledning siden år 2000, men ingen krav til øvrige emissionskomponenter
- Sverige: Ingen emissionskrav
- Tyskland: nationale krav til emission af CO og Støv (partikler) i kraft af 1. BImSch V forordningen fra 2010 [2]. Desuden de facto 'krav' til emission af OGC og NO_x i den meget udbredte frivillige mærkningsordning DIN Plus.
- Finland: Ingen emissionskrav
- Østrig: Krav til emission af CO, støv (partikler), OGC og NO_x – og desuden som det eneste land krav i lavlast til emission af CO og OGC, i kraft af deres Art 15 a B-VG-forordning, der blev indført i 2013
- Schweiz: Nationale krav til emission af CO og af støv (partikler) i kraft af LRV-forordningen der første gang blev indført i 1985

Samtlige krav og de tilhørende målemetoder opgør alle emissionerne som masse. Grænse-værdien kan være udtrykt enten som en emissionsfaktor i enheden gram per kg. træ afbrændt eller opgjort i forhold til udledt røggas volumen i enheden milligram per normalkubikmeter. Ser vi nærmere på de enkelte krav bemærkes, at Norge havde krav om måling af partikelemissionen ved op til fire laster, der spænder fra BR1 (lavlast) over mellemydelserne BR2 og BR3 til BR4 (maksimal ydelse). I Norge er der et interessant fagligt miljø opbygget omkring forskningsinstitutionen SINTEF Energi og Norges Teknisk Universitet. Begge projekter foregår i Trondheim, og genererer stor viden om forbrænding og reduktion af emissioner. SINTEF Energi arbejder for tiden med udviklingsprojektet SusWoodStoves, et projekt, der sigter på at

brændeovne også i fremtiden skal spille en rolle som en bæredygtig opvarmningskilde i Norge. I Norge er der en anden attitude overfor brændefyring, da store geografiske områder godt kan være ramt af udfald i elnettet i dage eller uger på grund af oversvømmelser eller kraftigt snefald. Derfor har der været krav om skorstene i private boliger fra det Norske bygningsreglement. Norge er ligeledes det land i norden med flest brændeovne i forhold til befolkningens størrelse. Der skønnes at være godt 2 millioner brændeovne. En Dansk filterfabrikant er deltager i SusWoodStove projektet, der har en vinkel om bedre bygningsintegration af brændeovne. <https://www.sintef.no/projectweb/suswoodstoves/>. Østrig havde krav både ved nominal ydelse og ved lavlast. De øvrige lande havde alene krav ved nominal ydelse.

Efter indførelsen af ecodesign kravene i 2022 gælder der kun krav ved nominal ydelse, idet medlemslandene ikke må have skrapere krav til de områder, der er reguleret af ecodesign. Norge forventes at blive tvunget til at annullere deres nationale partikelkrav med måling i flere laster fra det tidspunkt, den nye fælles standard for brændeovne EN16510 bliver publiceret i EU Tidende. Det skyldes CEN-regler om, at landene skal tilbagetrække eksisterende nationale overlappende standarder, når der udgives en ny harmoniseret europæisk standard. Måling af partielemissioner er ikke med i den nuværende brændeovnsstandard EN13240 fra 2001, men er inkorporeret i EN16510 standarden. De nye brændeovnsstandarder forventes offentliggjort i EU Tidende medio 2023.

5.2 Efterbehandlingsteknologi og tilskudsordninger

Vi vil nu se nærmere på nabolandenes nuværende krav til brug af efterbehandlingsteknologier til begrænsning af emissioner fra brændeovne. I dag er elektrostatisk ladning og fjernelse af partikler den mest udbredte teknologi til røggasrensning, skønt der stadig forskes i brug af katalysatorer og dybdefiltre til begrænsning af partikelemissioner.

Oplysningerne herunder stammer væsentligst fra IEA Bioenergy Task 32 rapporten "Inventory of national strategies for reducing the impact on air quality from Residential Wood Combustion" [18], udgivet i oktober 2022. IEA Bioenergy er en underafdeling af det internationale energiagentur IEA. IEA Bioenergy blev oprettet i 1978. Medlemmerne er primært fra Europa, men resten af verden er også repræsenteret, særligt lande som Canada, Australien og New Zealand. Indsatsområderne under IEA Bioenergy er inddelt i 'Tasks'. Task 32 beskæftiger sig med forbrænding og emissioner, og har Morten Tony Hansen fra rådgivervirksomheden EA Energianalyse som Task Leader. Teknologisk Institut deltager i Task 32 som observatør. Bland deltagerne i Task 32 findes deltagerne fra de førende fagmiljøer indenfor biomasseforbrænding TFZ i Tyskland, SINTEF Energy Research i Norge, Verenum i Schweiz og BEST i Østrig. Task 32 har i en ny rapport fra 2022 [18] bidraget med viden om krav og anvendt teknologi fra en række af de relevante nabolande. ESP filtre og katalysatorer som efterbehandlingsteknologier er medtaget i studiet.

I en spørgeskemaundersøgelse har IEA Task 32 undersøgt hvordan landene fremmer og understøtter brug af røggasefterbehandlingsteknologier. Det fremgår ikke, at nogen lande har uomgængelige lovfæstede krav om brug af ESP'er, men nogle lande yder tilskud til opsætning af ESP'er enten nationalt eller regionalt. I Tyskland kan eftermontering af et partikelfilter blive den sidste udvej, hvis et fyringsanlæg ikke kan bringes ned under 150 mg/Nm³ og hvis ejeren ikke ønsker at udskifte fyringsanlægget med et nyt. I tabellen nedenfor vises sammenfatningen af, hvilke lande, der modtager tilskudsydelse til opsætning af ESP'er.

TABEL 3. Lande der yder tilskud til opsætning af ESP'er

Land	Østrig	Schweiz	Tyskland	Danmark	Italien	Holland	Norge	Sverige
Svar	Nej	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej

Vi vil nu se nærmere på de lande, hvor der ydes eller har været ydet tilskud, idet tilskudsordningerne gerne er åremålsbegrænsede

5.2.1 Schweiz

I øjeblikket er der ingen tilskud på nationalt plan, men der var tidligere regionale midler til opsætning af ESP'er i boliger med brændefyring i kantonerne Grisons og Lucerne. Og i øjeblikket (Oktober 2022) er der tilskud til ESP'er i kantonerne Thurgau og Grisons. Kantonen Thurgau subsidierer udskiftning af et olie- eller gasvarmesystem med et brændefyret centralvarmesystem med CHF 7.000 (enkelt- og flerfamiliehuse). Hvis der ligeledes er installeret en ESP med en virkningsgrad på mindst 60%, ydes yderligere CHF 1.000. Kantonen Grisons subsidierer installationen af en ESP med op til 3.000 CHF afhængig af den installerede forbrændingsteknologi. Schweiz har i forbindelse med fremmelsen af filterbrug gennemført 3 pilotprojekter om brug af ESP'er, ét for flere år siden i regionen Luzern i det centrale Schweiz, ét i regionen Misox i kantonen Grisons, og ét i landsbyen Sass Fee i kantonen Valais, hvor flere huse med brændeovne eller brændekedler var udstyret med ESP'er, samt en præstationsovervågning i samarbejde med forskningsinstitutioner.

Teknologisk Institut har fået resultaterne af pilotprojektet i Sass Fee fra samarbejdspartneren Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik (FHNW), og de sammenfattes kort her:

Forskellige ESP filtre blev opsat på omkring 30 husstande i lokalsamfundet Sass Fee med forskellige typer af pejse og brændeovne, heraf 20 af typen Oekorona. Der er data fra disse 20 husstande. Måleperioden var en hel fyringssæson fra begyndelsen af november til begyndelsen af maj det følgende år. Effektiviteten svinger mellem 50-90% partikelreduktion med 70% som middelværdi.

5.2.2 Tyskland

For brændeovne er der ingen generelle tilskud i Tyskland. Kun i udvalgte kommuner har kortsigtede programmer været effektive til at fremme eftermontering af ESP'er i kombination med brændeovne, f.eks. i byen Aachen, hvor der i en periode blev givet 500 € i tilskud. For kedler, der er udstyret med en støvudskiller, var der et særligt langsigtet tilskud på føderalt niveau. Programmet er nu udløbet; det blev erstattet af et nyt tilskudsprogram (BEG EM af 16/9 2021), der fik virkning fra 1. januar 2023, hvor der ikke længere tages særligt hensyn til udskillere. Sådanne enheder understøttes nu indirekte af en forhøjet tilskudssats når kedlen opfylder et ultralavt PM-emissionskrav på maks. 2,5 mg/Nm³ (ved 13 % O₂), og med en kulliteudledning under 200 mg/Nm³ ved nominel ydelse, dokumenteret under en typetest. En tysk kedelfabrikant, Heizomat, oplyser, at tilskuddet i perioder har være oppe mod 50% af den samlede installationspris, hvorfor der er opstillet rigtig mange biomassekedler, der opfylder emissionskravene uden behov for retrofitting med et partikelfilter. Heizomat oplyser videre, at det ikke er særligt udbredt at retrofitte de mindre husstandskedler med elektrofiltre. Behovet kan godt opstå hen imod slutningen af kedlens anslåede levetid på omkring 30 år, hvis da ikke brugeren inden har valgt at udskifte kedlen med en ny med opdateret teknologi og bedre fyringsøkonomi.

Fravær af en europæisk harmoniseret standard for partikelfiltre er med til at hæmme markedsudviklingen og fordyre godkendelse af filtre for fabrikkerne. Derfor har filterfabrikanter været henvist til at lade deres filtre godkende på hvert marked efter nationale godkendelsesordninger. Idet Tyskland og Schweiz hidtil har været de mest prominente markeder for partikelfiltre, er det ikke sikkert at fravær af en europæisk standard har haft stor negativ indflydelse. Men i takt med, at flere lande begynder at interessere sig for partikelfiltre, som et redskab til at nedbringe emissionerne fra ovne og kedler, vil fordelene for filterfabrikanter ved en fælles europæisk godkendelsesordning, baseret på en harmoniseret standard, og med en CE-mærke som det synlige resultat, blive mere og mere iøjnefaldende.

De senere år er der indenfor fastbrændselskedlerne sket en systemintegration af partikelfiltret og kedlen. Ud over at spare den individuelle godkendelse af filteret, reduceres den samlede

fremstillingspris ligeledes for kedler og filtre, og kedlen kan markedsføres som en lavemissionskedel og opnå tilskud efter den nye føderale regulering for effektive bygninger, individuelle foranstaltninger (BEG EM) [21] For ESP'er, der bruges til at blive eftermonteret eller kombineret med brændeovne, blev der for nylig offentliggjort godkendelseskriterier til et nyt miljømærke (Blauer Engel). Kriterierne findes i Blauer Engel dokumentet DE-UZ 222, januar 2022. Disse mærkede produkter er dog endnu ikke tilgængelige på markedet (februar 2023). I Tyskland har den offentlige debat om partikelforurening blandt andet været ført af NGO'en Deutsche Umwelthilfe. Deutsche Umwelthilfe (DUH), der er en parallelorganisation til Rådet for Grøn omstilling, lancerede i september 2021 kampagnen 'Keine Ofen ohne Filter', hvor de har henvendt sig til 100 tyske byer. Pressemeddelelsen findes i litteraturafsnittet. [14] De øvrige lande Østrig, Danmark, Italien, Holland, Norge og Sverige har ingen krav eller tilskudsprogrammer, der fremmer udbredelse af partikelfiltre i landene.

Vi vil nu se nærmere på anvendelse af en anden kendt efterbehandlingsteknologi, katalysatorer. Brug af katalysatorer er i forvejen kendt og udbredt til begrænsning af emissioner fra forbrændingsmotorer. Visse katalysatorer er også egnede til begrænsning af emissioner fra brændeovne. Katalysatorer omdanner emissionskomponenter gennem en termisk og kemisk reaktion. I modsætning til ESP'ere kan katalysatoren også reagerer på gasser. De kan eksempelvis let omdanne CO til CO₂. Katalysatorer er modsat ESP'ere velegnede til indbygning i brændeovne, fordi den katalytiske reaktion kræver forholdsvis høje temperaturer for at være effektiv. I USA har der længe været tradition for brug af katalysatorer i brændeovne, grundet amerikanernes præference for at fylde meget træ på ovnen, skrue ned for lufttilførslen, og lade ovnen brænde natten over. I Europa har der ikke været en udbredt tradition for brug af katalysatorer i brændeovne, da ovnene kan klare emissionskravene i kraft af optimering af brændkamre og luftsystemer, og fordi vi i Europa næsten udelukkende bruger brændeovnen til intermitterede forbrænding, altså regelmæssig påfyldning af mindre portioner brænde ad gangen, en gang i timen. Senest har de meget lave emissionsgrænser for brændeovne i miljømærket Blauer Engel dog nødvendiggjort brug af en katalysator. Den fornyede opmærksomhed kan godt føre til, at brændeovnsfabrikanter får øjnene op for de muligheder, som en katalysator indebærer, også ud over de miljømærkede ovne. Som tilfældet er med ESP'ere, forudsætter optimalt udbytte af en katalysator også krav til driftsbetingelserne og regelmæssigt eftersyn og rengøring.

Ingen lande oplyser at have krav om brug af eller tilskudsordninger til fremme brug af katalysatorer. Det forventes dog at katalysatorer kan få en vis udbredelse særligt i Tyskland, idet miljømærket Blauer Engel har krav til udledning af CO på under 500 mg/Nm³, hvilket dårligt kan opfyldes uden brug af katalytiske efterbehandling af røggassen. En større udbredelse af katalysatorer vil formodentlig være afhængig af enten generelt skærpede ecodesign krav, miljøzonekrav eller lokale påbud.

Som endnu en efterbehandlingsteknologi, vil vi kort berøre de såkaldte dybdefiltre. Et dybdefilter er en variant af en katalysator og det består af et åbent keramisk opskummet materiale med en cellestruktur med stor overflade, hvori der indgår et katalytisk element. Den store overflade i forbindelse med cellestrukturen giver et godt absorptionsområde for fine partikler i røggassen uden introduktion af et stort tryktab i aftrækssystemet. I de kolde forbrændingsfaser (opvarmning, afkøling eller lav belastning) aflejres disse partikler på filteroverfladen. Når brændeovnen har nået sin driftstemperatur (nominel varmeydelse), er dybdefiltret så varmt, at de aflejede partikler afbrændes, således der opstår en selvrensende effekt.

Teknologisk Institut har tidligere undersøgt effekten af et dybdefilter for Miljøstyrelsen. Det var i miljøprojekt nr. 1528 fra 2014. Projektet var "Udvikling af en brændeovn med tokammer katalytisk forbrænding". I rapporten omtales dybdefiltret som et 'skumfilter' med zirkoniumoxid som det aktive katalytiske stof. I forhold til de øvrige undersøgte katalysatorer udviste dybdefiltret den bedste reduktionsgrad, men det var også det materiale, der havde det relativ højeste

tryktab, dog ikke i en grad der forhindrede fortsat drift af brændeovnen ved naturligt skorstens-træk. Dybdefiltret ses afbilledet i 1528 samt rapportens figur 21 og 22.

Den tyske brændeovnsfabrikant HARK er aktuell med en ovnserie benævnt ECOPLUS, der benytter et dybdefilter til røggasrensning. Filtret skal rengøres regelmæssigt, men rengøringen er enkel, og kan udføres af brugeren selv. Dybdefiltret udtages og rengøres ved hjælp af en støvsuger eller trykluft, eller det kan skylles rent med en håndbruser.

5.3 Miljømærkningsordninger

I det følgende vil vi se nærmere på frivillige mærkningsordninger.

5.3.1 Nordic Ecolabel – Svanemærket

Svanemærket har kravniveauer for brændeovnes partikeludledning på maksimalt 2 g/kg og OGC under 100 mg/Nm³, samtidig med at virkningsgraden skal være på mindst 83%. Der er ingen krav til partikelantal, og de har ingen godkendelseskriterier for partikelfiltre. Dog er de opmærksomme på Blauer Engel mærket for brændeovne og følger udviklingen i Tyskland. For tiden er tilslutningen til svanemærket blandt brændeovnsfabrikanter ret begrænset. I svanemærke sekretariatet foretages overvejelser om, hvorvidt det er muligt at revitalisere mærket for brændeovne. Kriterierne skal evalueres i foråret 2023.

5.3.2 Flamme Verte

Det franske miljømærke Flamme Verte har kriterier for brændeovne, men ingen for partikelfiltre. Flamme Verte har indtil 2022 tildelt tre, fire eller fem stjerner alt efter ovnens forbrændingsegenskaber. Efter Ecodesign trådte i kraft den 1. januar 2022, er det kun kategorien "5 stjerner", der er tilbage. Til gengæld er Flamme Verte begyndt at introducere krav om måling af brændeovnes emissioner i lavlast. Fra 2022 skal ovne, der udtages til kontrolmåling, også have målt emissioner og virkningsgrad i lavlast. Fra 2025 skal brændeovnsfabrikanterne deklarere ovnenes egenskaber i lavlast, og fra 2028 ventes Flamme Verte at indføre grænseværdier for emissioner og virkningsgrad i lavlast.

5.3.3 Blauer Engel

Det tyske miljømærke Blauer Engel har siden 2020 haft mærkningskriterier for brændeovne, DE-UZ 212. I relation til partikeludledning kræves maksimalt 15 mg/Nm³ som masse, og maksimalt 5 millioner partikler pr. cm³ som antal.

TABEL 4. Godkendelseskriterier for brændeovne efter Blauer Engel miljømærket, udtrykt hhv. for rågassen før filtret og efter partikelfiltret. Ecodesign grænseværdierne for brændeovne er vist til sammenligning. Det ses, at en kandidatovn til Blauer Engel miljømærket skal have bedre forbrændingsegenskaber end en ecodesignovn.

Parameter	Målemetode	Krav til Rågassen (før filtret)	Blauer Engel grænseværdier (efter filtret)	Ecodesign krav (2022-24) for brændeovne (til sammenligning)
Partikelmasse	EN16510-1	40 (mg/Nm ³)	15 (mg/Nm ³)	40 (mg/Nm ³)
Partikelantal	Blauer Engel Protokol	-	5 X 10 ⁶ / cm ³	Ingen krav
CO	EN16510-1	500 (mg/Nm ³)	500 (mg/Nm ³)	1500 (mg/Nm ³)
OGC	EN16510-1	70 (mgC/Nm ³)	70 (mgC/Nm ³)	120 (mg/Nm ³)
NOx	EN16510-1	180 (mg/Nm ³)	180 (mg/Nm ³)	200 (mg/Nm ³)

For tiden er der godkendt fem ovne i Blauer Engel, alle fra Tyske fabrikanter: Droof, Skantherm (2 ovne), Woodke og HASE. For at blive godkendt kræves det, at en ovn har både katalysator, elektrostat filter, spjældautomatik og driftstimetæller. Blauer Engel har som det eneste

miljømærke mærkningskriterier for partikelfiltre som stand-alone enheder, DE-UZ 222 udgivet i januar 2022. Kravniveauerne svarer til ca. en tredjedel af kravniveauerne i 1185 ecodesign forordningen for brændeovne. For at blive godkendt kræves det, at et partikelfilter yder mindst 65% reduktion af PM_{total}, 80% reduktion af PM₁₀ og 90% reduktion af partikelantallet [17].

5.4 Delkonklusioner, krav i nabolandene

Ingen af de undersøgte lande har egentlige krav om brug af partikelfiltre, men både Tyskland og Schweiz har i perioder understøttet brug af partikelfiltre gennem tilskudsordninger. Man kan sige, at Tyskland har et indirekte krav om brug af partikelfiltre i kraft af deres feltmålinger på fyringsanlæg til fast brændsel. Hvis ikke en kedel havde under 150 mg/Nm³ i målt partikel-emission, fik ejeren krav om enten at nedbringe emissioner eller lade et partikelfilter eftermontere, hvis ikke det var muligt at optimere fyringsanlægget yderligere. Han kunne naturligvis også vælge at udskifte fyringsanlægget med et nyt godkendt anlæg. Idet nye brændeovne ikke er dyrere at anskaffe end et partikelfilter, og brændeovne først er blevet omfattet af krav om feltmåling for ganske nyligt, overrasker det ikke, at der primært er blevet eftermonteret partikelfiltre på de større og dyrere kedelanlæg. Og den effekt er slået tilbage på filterfabrikanterne, der ikke har oplevet nogen synderlig efterspørgsel på partikelfiltre, som er decideret beregnede til brændeovne. Siden 2020 er der dog opstået en fornyet, men dog stadig begrænset interesse for partikelfiltre til brændeovne, idet Blauer Engel miljømærket for brændeovne stiller krav om brug af et partikelfilter. Der er i den forbindelse kommet et nyt filter på markedet, og flere kan være på vej. Katalysatorer til røggasrensning er en anden mulig begrænsningsteknologi, der muligvis står overfor et opsving i Europa. Ingen lande har krav om brug af katalysatorer, men en katalysator har nogle egenskaber, der gør, at den er let at bygge sammen med en brændeovn. Både for partikelfiltre og katalysatorer gælder det, at de ikke er nødvendige for at få brændeovnene til at opfylde de europæiske ecodesign krav, hvorfor deres anvendelse endnu er ret nichepræget.

6. Delopgave 5 Mulige partikelreduktionskrav ved typegodkendelse

Opgaveformulering: "Der ønskes en model for hvilket partikelreduktionskrav ved typegodkendelse, der kan fastsættes, blandt andet for at sikre mindst samme reduktionseffekt som ved udskiftning fra gammel til ny brændeovn.

Et krav på for eksempel minimum 70% reduktion af PM_{2,5} ved filterløsning, vurderes ud fra nuværende viden i alle tilfælde at sikre en partikelreduktion på en gammel brændeovn på mindst samme niveau som udskiftning til en ny brændeovn. For at kunne indgå i en Blauer Engel godkendelse, kræves en massereduktion på mindst 75% og fra 1. januar 2022 en partikelantalsreduktion på mindst 90%."

6.1 Litteraturgennemgang

Med en lang historik og mange målinger, der understøtter, at gamle brændeovne har højere partikelemission end nye, målt som masse, er det vanskeligt at uddrage en tilsvarende tydelig sammenhæng, når der måles partikelantal. Partikelantal måles ikke ved typeprøver, men kun i videnskabelige projekter, hvor målebetingelserne langt fra er homogene. Teknologisk Institut har derfor afsøgt tidsskrifter og samlinger af videnskabelige artikler for at finde oplysninger om brændeovnes målte partikelantalskoncentrationer som supplement til instituttets egne begrænsede målinger af partikelantal. På trods af det høje antal publicerede artikler af forskellige forskere, er mængden af data stadig begrænset. En del artikler har kun rapporteret størrelsesfordeling, andre rapporterer partikelantal som funktion af indfyret brændemængde i enheden antal/MJ. Andre rapporterer partikelantal i rumluften indendørs eller i udemiljøet. Nogle afrapporterer partikelantal opdelt i optænding, stabil forbrænding og udbrænding, andre kun som midelværdi eller uoplyst. Nogle målinger stammer fra pilleovne, der kører i kontinuert stabil drift, så snart de er kommet i gang. Endelig spiller det anvendte brændes fugtindhold også en rolle for partikeldannelsen og for fordelingen mellem partikler og PAH'er.

Af hensyn til konsistens har vi kun medtaget resultater fra brændeovne og lignende, der afrapporterer partikelantalskoncentration i enheden antal pr. volumenenhed. Mest gængs er antal partikler pr. kubikcentimeter (Pn/cm³), og hvis det er oplyst, hvor i forbrændingscyklussen tallene stammer fra, er det oplyst i skemaet herunder.

Herunder opregnes nogle relevante kilder:

- Obaidullah et al. har udsendt flere papers, bl.a. i 2012, 2015 og 2019
- Brookhaven National Laboratory i USA har offentliggjort et studie der opsamler oplysninger om emissioner fra 80 andre videnskabelige publikationer
- Jarko Tissari et al. har udgivet et studie om partikelemissioner fra saunaovne
- Cordini et al. har udgivet studier af partikelemissioner fra brændeovn og en pilleovn
- Johanneson et al. Har udgivet en artikel om partikelemissioner fra gamle og nye brændekedler
- Ozegon et al. Har udgivet en artikel over målinger på en brændeovn

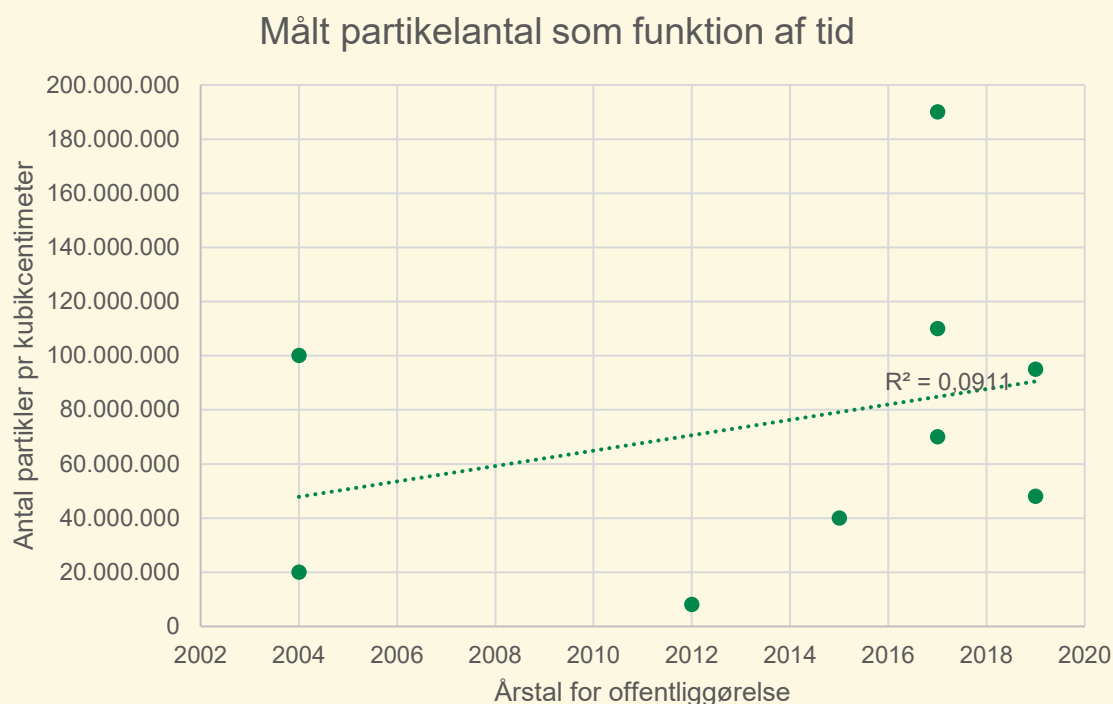
Fælles for alle kilder er deres oplysninger om partiklernes middelstørrelse, der langt overvejende er under PM1, altså tilhørende kategorien de fine partikler (FP). Brookhaven sammenfatter, at 95% af partiklerne er mindre end 400 nm, herunder at 30% af partiklerne er under 100 nm, nanopartikler, ofte forkortet NP i litteraturen. Nyere studier antyder, at en endnu større andel af partiklerne er under eller grupperet omkring de 100 nm.

Når det kommer til partikel antal oplyser nogle studier et interval, andre en middelstørrelse. Partikelantalskoncentrationen følger gerne en kurvefordeling, der minder lidt om en normalfordelingskurve. Der ses en tydelig spids ved en given partikelstørrelse og faldende antal på begge sider af spidsen. Nogle afrapporterer om to spidser ved forskellige partikelstørrelser. Alle disse forskellige vilkår gør det vanskeligt med sikkerhed at sammenligne måleresultaterne og vide med sikkerhed, at der er målt under de samme betingelser. Vi uddrager derfor ikke konklusioner på decimalen, men de oplyste partikelantal er alligevel med til at tegne et billede af en spændvidde for målinger af brændeovne, som det illustreres i tabel 12 herunder. Partikelantal oplyses gerne som et decimaltal efterfulgt af en eksponent, eksempelvis $1,35 \times 10^7 / \text{cm}^3$ ($13\frac{1}{2}$ million partikler per kubikcentimeter)

TABEL 5. Litteraturoversigt med sammenlignelige oplysninger af partikelantal pr volumenenhed

Kilde	Publiceret	Partikelantal	Bemærkninger
Johansson et al	2004	2×10^7	GI kedel, lille brændeklods
Johansson et al	2004	1×10^8	Ny kedel, 15% brænde fugt
Obejdullah et al	2012	$0,8 \times 10^7 - 5,5 \times 10^9$	Litteraturstudie over artikler i årene 2000 – 2010
Obejdullah	2015	$2,7 - 5,3 \times 10^7$	To pejseindsatse på hhv 10 og 20 kW
Corsini et al	2017	$7,0 \times 10^8$	Bøg (Brookhaven rapport)
Corsini et al	2017	$1,9 \times 10^8$	Fyr (Brookhaven rapport)
Corsini et al	2017	$1,1 \times 10^8$	Pilleovn
Obejdullah et al	2019	$1,4 - 8,8 \times 10^7$	Moderne pilleovn på 5 kW
Tissari et al	2019	$3,6 - 6,1 \times 10^7$	Saunaovn

Data er vist grafisk herunder i figur 8 ordnet efter årstal for publikation. Middelværdi er anvendt de steder, hvor partikelantal er oplyst som et interval. Formålet har været at kunne belyse udviklingen af instrumenter og målemetoder over tid, hvilket har vist en tydelig udvikling i retning af afrapportering af mere ensartede partikelantal, enten større eller mindre. Det fremgår ikke at være tilfældet, idet korrelationsfaktoren R^2 er så lav som 0,1. Værdien skal helst være 0,9-1 for, at en lovmæssig sammenhæng kan anses for påvist.



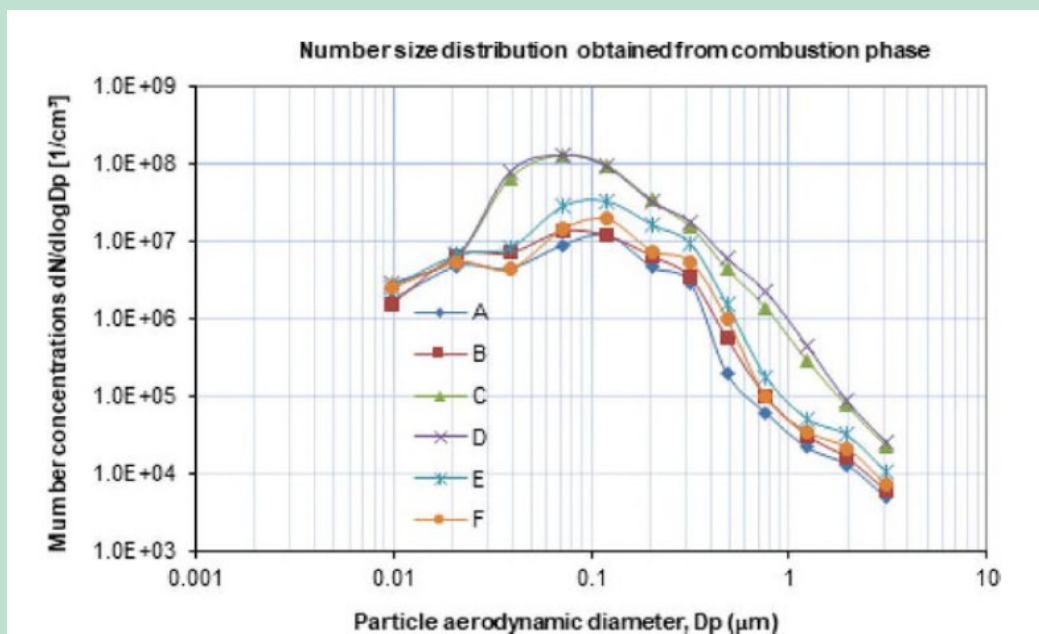
FIGUR 7. Afrapporterede partikelantal pr. volumenenhed som funktion af tid. R^2 værdien på 0,1 viser at der ingen lovmæssighed er mellem tidspunkt og det afrapporterede antal.

6.2 Analyse af den fundne litteratur

Formålet er at vise den store variation i de afrapporterede partikelantalskoncentrationer. En variation, der dækker over forskellige anlægstyper, brændsler og anvendte måleinstrumenter. Selv i nyere tid (2017) ses stor variation indenfor samme årstal.

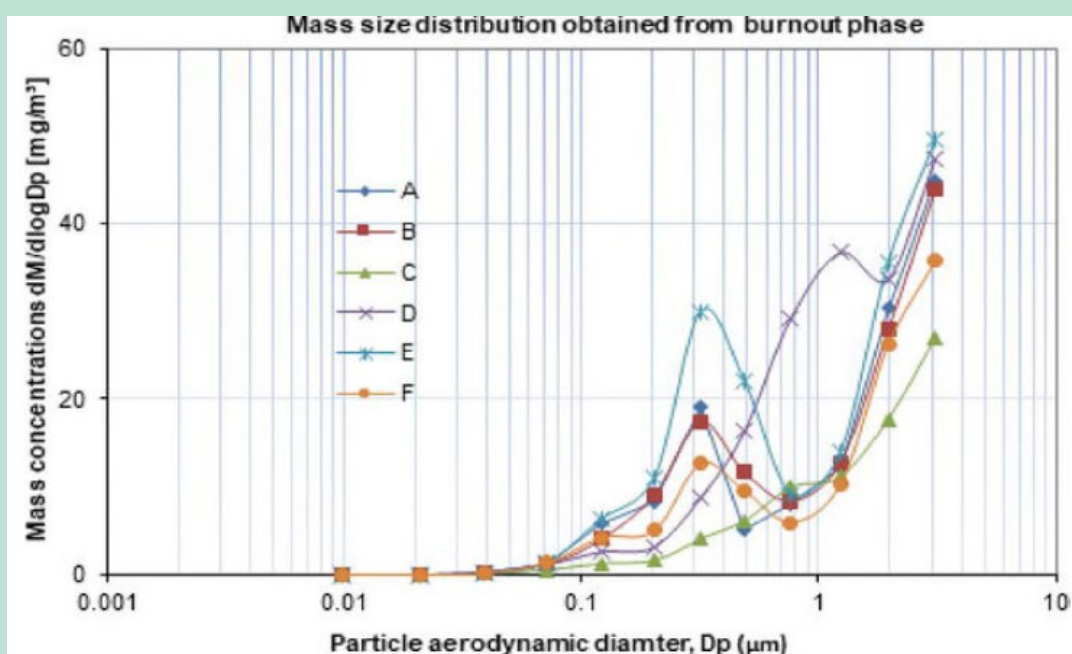
Punktfordelingen viser, at det er svært, grænsende til umuligt, at sammenligne partikelantalsoplysninger fra litteraturen i den angivne tidsperiode, da intervallet er meget stort. Selv når forfatterne har oplyst en del betingelser og forudsætninger, som f.eks. type af brændeovn, brændslets beskaffenhed eller den anvendte partikeltæller, er oplysningerne ikke tilstrækkeligt konsistente til at sikre sammenlignelighed. Nogen oplyser brændets fugtindhold, andre ikke. Nogen inddeler en fyringscyklus i faser, andre afrapporterer et middeltal for hele cyklussen. Nogen oplyser spjældindstilling, andre ikke. Nogen måler direkte i den varme røggas, andre i fortyndingstunnel. Der ses generet ikke oplysninger ominstrumentets kalibreringsstand. Instrumenterne har også forskellige fortyndingsprincipper, og nogle har et cut-off, der frasorterer partikler over en vis størrelse. Hertil kommer at partikelantal altid skal ses i sammenhæng med en størrelsesfraktion. Figur 9 fra Obeidullah et al., 2020 viser partikelantalsfordelingen som funktion af partikelstørrelsen. Det ses at de højeste partikelantal på omkring 10.000.000 partikler pr cm^3 forekommer omkring 0,1 mikrometer partikel størrelse (de ultrafine partikler), og tilsvarende ret få partikler større end 1 mikrometer i diameter (fine partikler eller $\text{PM}_{2,5}$ jf. fig. 6), cirka i størrelsesordenen 100.000 – 200.000 partikler pr cm^3 .

(A-F er forskellige forsøgssekvenser, uden betydning for opfattelsen af figurens principielle antalsfordelingsprofil)



FIGUR 8. Typisk partikelantalsfordeling for brændeovne (kilde: Obeidullah et al., 2020).

Det forholder sig derimod omvendt med partikelmassen, som fremgår af figur 10 og illustreret i figur 4. Næsten al massen findes blandt partikler større end 1 mikrometer, dog med en lille spids nede omkring 300 nm i diameter. Derimod har partiklerne under 100 nm (de ultrafine partikler) så godt som ingen masse.



FIGUR 9. Typisk partikelmassefordeling for brændeovne (kilde: Obeidullah et al., 2020)

6.3 Andre oplysninger

Flere af de skriftlige kilder oplyser samstemmende, at nye brændeovne og kedler ikke pr. definition udleder færre partikler end de gamle ovne og kedler, men der er konsensus om at de

udleder lavere partikelmasse. Samtidig oplyser flere, at årsagen til at brændeovne, kedler og pillefyr har høj forekomst af de ultrafine partikler, skal søges i træets sammensætning. Indhold af de mineralske forbindelser som Kalium, Natrium, Svovl, Klor og Zink tilskrives at danne mange ultrafine partikler under forbrænding og afkøling. Årsagssammenhængen menes at falde i to afdelinger. Det ene er, at renere forbrænding ved højere temperatur får flere af mineralerne til at fordampe, og giver potentiale til partikeldannelse når forbrændingsprodukterne begynder af afkøles. Det andet er, at ved reduktion af antallet af de store partikler, vil flere af de små partikler blive udledt i uændret form, fordi de ikke har så mange store partikler at binde sig til under passage op gennem skorstenen.

6.4 Sekundær aerosoldannelse og helbredseffekter

For bedre at forstå sammenhængene mellem luftforurening og afledte helbredseffekter, er der behov for mere viden om emissionernes karakter. DCE Miljø har undersøgt partikeludledningers sammensætning, antals- og størrelsesfordeling og afrapporteret resultaterne i rapporten SR500 'The Particle Project' fra 2021. Partiklerne er ikke bare opgjort som de kendte fraktioner PM10 og PM2,5 men også som de ultrafine partikler i størrelsesområdet 11-ca. 500 nanometer. Desuden er indholdsfraktionen Elemental Carbon opgjort særskilt. Elemental Carbon (EC) er et synonym for Black Carbon (BC) Rapportens ophavsmand skriver: "Partikler kan dannes af gasser ved såkaldte fotokemiske reaktioner – kemien i luften ændrer sig dermed, når stoffer bliver udsat for lys. De fotokemiske reaktioner mellem partiklernes gasformige forstadier forløber kun, når der er sollys, og derfor ses et relativt stort bidrag til den samlede mængde partikler fra de fotokemiske reaktioner om sommeren", og "Nye resultater af luftkvalitetsmålinger viser, at luften i Danmark er blevet mindre forurenet med ultrafine partikler gennem de seneste årtier og at niveauet af ultrafine partikler i 2021 var på niveau med 2020. Resultaterne viser også at de kemiske processer i luften fører til flere partikler om sommeren. Og det er solen medvirkende til".

Ifølge DCE-rapport SR533, Luftkvalitet 2021 af Ellermann m.fl. [22] koster luftforurening i Danmark 3.930 for tidlige dødsfald i Danmark. Af dem skyldes de 2.910 fjernetilført luftforurening nede fra Centraleuropa. Størstedelen af tabene kan henføres til udsætning for partikler, men også kvælstofoxider og ozon spiller også en rolle.

EU's handlingsplanen for nulforurening har til formål at reducere antallet af for tidlige dødsfald som følge af eksponering for fine partikler med 55 % i 2030 sammenlignet med 2005 baseline. I 2020 var antallet af for tidlige dødsfald, der kunne henføres til eksponering for fine partikler over WHO's vejledende niveau, faldet med 45 % i EU-27 i forhold til 2005. Hvis denne nedgangsrate fastholdes, vil EU nå det førnævnte mål for handlingsplanen for nulforurening inden 2030 svarende til et antal for tidligt døde på 150.000.

Privat brændefyring anses som en væsentlig bidragsyder til partikeludledningen, og da man ikke kan forvente, at de europæiske ecodesign emissionsgrænser i en overskuelig fremtid, vil blive hævet til 'ecolabel-niveau', er der grund til at søge andre virkemidler, som kan accelerere faldet i emissionerne. Lokale miljøzoneforbud eller begrænsninger er en af mulighederne, der kan bringes i anvendelse, uden at gå i konflikt med EU-regler. En anden mulighed er at stimulere til øget brug af efterbehandlingsteknologier, som partikelfiltre eller katalysatorer, men også indirekte virkemidler, som brug af forbrændingsautomatik eller røgsgugere, kan spille en positiv rolle.

Hvad der sker med partikelemissionerne når de har forladt skorstenen, er en kompleks sammenhæng. For bedre at kunne relatere emissionerne til helbredseffekterne, er det vigtigt at prøve at forstå mekanismerne bag sekundær aerosoldannelse, da det folk indånder, ikke er det samme, der kommer ud af skorstenen. Allerede inden stofferne har forladt skorstenen sker der en primær aerosoldannelse, som fortsætter over i sekundær aerosoldannelse ude i miljøet.

For at illustrere processerne har Alison Mariko Frankhauser vist denne figur i sin doktordisputats fra 2020 'Formation and Degradation of Secondary Organic Aerosol Material 2020', der illustrerer de komplekse sekundære aerosoldannende processer, der finder sted ude i miljøet, når udladte partikler bliver udsat for fotokemiske reaktioner og påvirkninger af fugt. Primære aerosoler er lidt forsimplet det, som forlader skorstenen, hvor de sekundære aerosoler er de reaktionsprodukter, der dannes ude i miljøet afhængig af hvilke øvrige andre substanser, der er til stede, luftens fugtindhold og bestråling med synligt og ultraviolet lys. Hvor det længe har været kendt, at de organiske gasser ændrer form og karakter, er det en relativ ny erkendelse at fugt og nedbør også kan påvirke aerosolerne. F.eks. vil mineralholdige partikler kunne opløses af luftfugtighed og nedbør, så stofferne udfældes på jorden sammen med nedbøren.

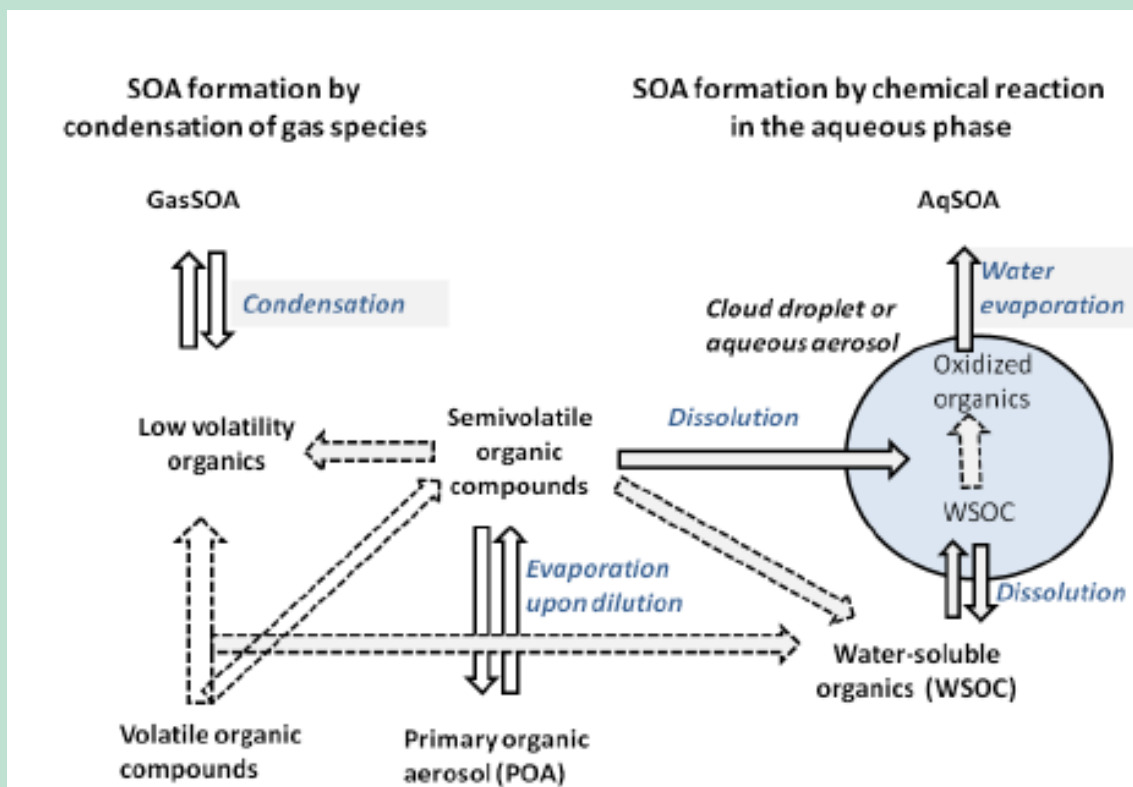


Figure 1.3: Schematic of traditional gasSOA and more recently discovered aqSOA formation pathways in the gas and aqueous phases of the atmosphere. Dashed arrows denote oxidation reactions. Reproduced from Ervens, Turpin, and Weber [46].

FIGUR 10. Kompleks sekundær aerosoldannelse med de kendte reaktioner af de organiske gasser vist i venstre side og de nyligt erkendte reaktioner pga. luftens fugtindhold eller nedbør vist i højre side.

Professor Merete Bilde fra Århus Universitet har på en workshop på Teknologisk Institut om partikler omtalt de forskellige aerosolers henfaldstider og transportpotentiale ude i miljøet, med henvisning til lærebogen Atmospheric Chemistry and Physics af Seinfeld&Pandis.

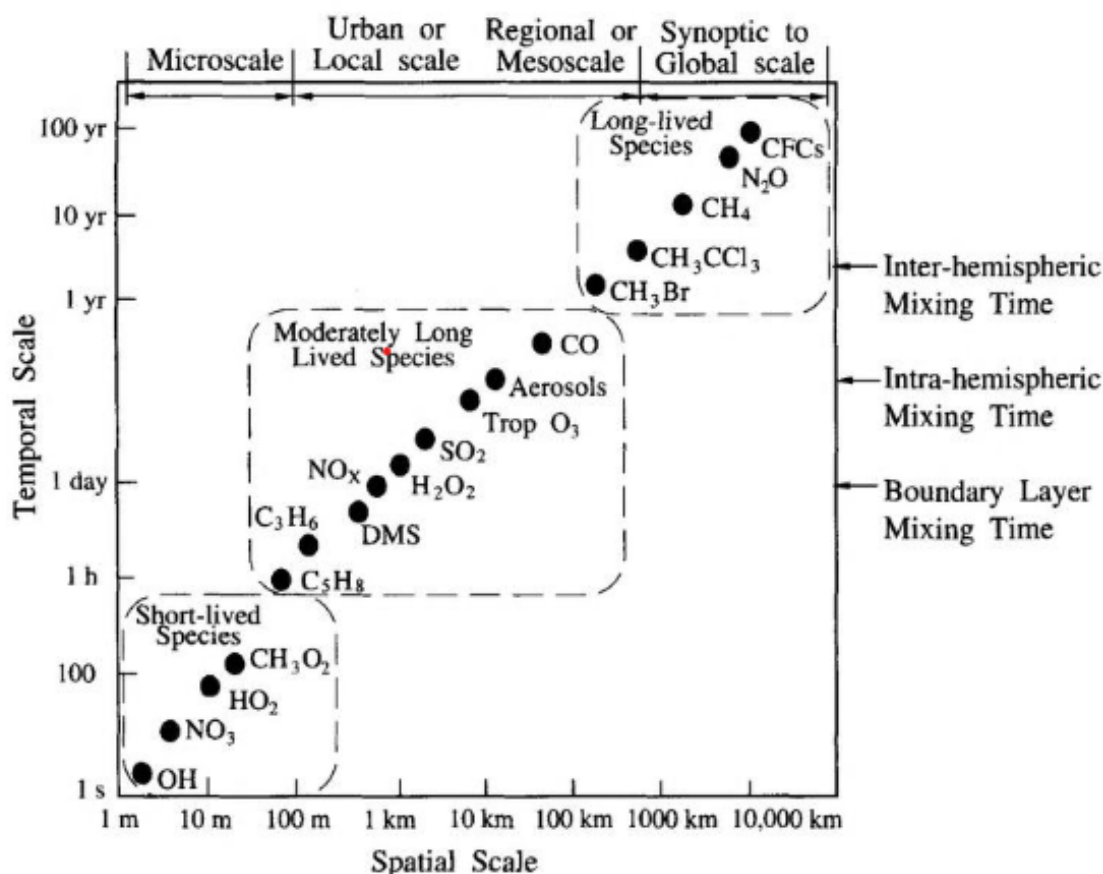


FIGURE 1.4 Spatial and temporal scales of variability for atmospheric constituents.

FIGUR 11. Forskellige partiklers henfaldstider og transportpotentiale fra lærebogen Atmospheric Chemistry and Physics af Seinfeld&Pandis.

Med baggrund i litteraturen inddeler Bilde aerosolerne i Short lived species, Moderately long lived species og Long lived species efter deres henfaldstid. De kortlivede henfalder i løbet af 0-1 time og har et begrænset transportpotentiale, de middel langlivede henfalder i løbet af timer til uger eller endda måneder, og har et transportpotentiale på alt fra 100 meter til flere hundrede kilometer. Til sidst tager de egentligt langlivede mere end et år om at henfalde, og har et stort transportpotentiale. I relation til de kendte emissionskomponenter fra brændeovne genkender vi ammoniak (NH_3), der henfalder på under én time, OGC'er (C_xH_y) der henfalder på timer til et døgn, Kvælstofoxider (NO_x) der henfalder på et par dage, og Metan (CH_4), der tager ét år om at henfalde (metan forbliver på gasform ved normalt tryk og temperatur, og bi-drager således ikke til partikeldannelse.)

Diskussionen af fordele og ulemper ved udskiftning af brændeovne contra eftermontering af et partikelfilter fortsætter i hovedopgaven, afsnit 8.

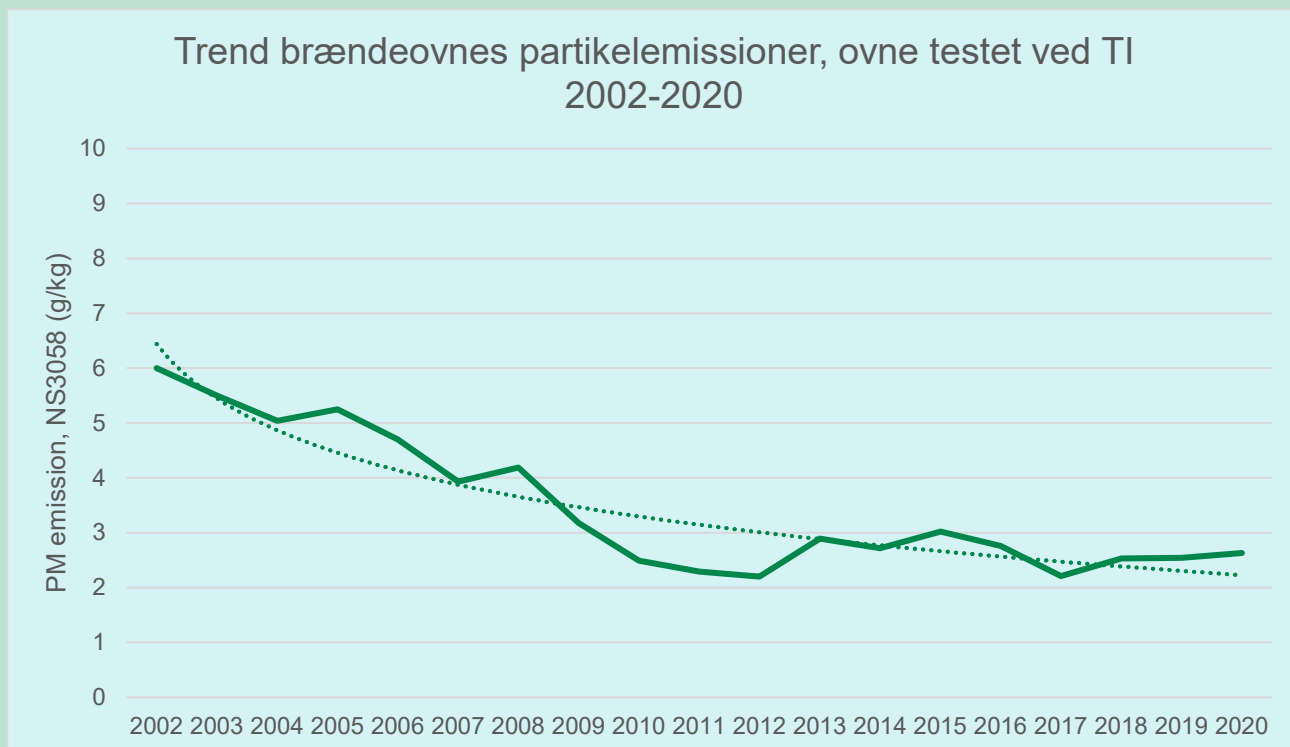
6.5 Delkonklusion, partikelreduktionskrav

I dette afsnit har vi set, at partikelantalsmålinger på brændeovne og kedler kan give resultater, der svinger med flere dekader fra den ene undersøgelse til den næste. Det skyldes, at måling af partikelantal endnu ikke er udviklet til en standardiseret målemetode, men bedrives forskelligt fra universitet til universitet og fra land til land. Det betyder at man skal være forsigtig med

at overføre resultater fra enkelte studier til generelle forhold, herunder at sammenligne reduktionsgrader mellem studier. Dog har introduktion af krav til partikelantalsreduktion i Blauer Engel miljømærket ført til en form for standardisering af målemetode og målebetingelser, noget der måske kan sprede sig til sektoren og danne model for en standardiseret metode.

Vi har også set at stort set alle partikler fra brændefyring er under PM₁, og at de højeste partikelantal findes nede omkring PM_{0,1}, altså de ultrafine partikler. Noget af formålet med denne del af opgaven var at få belyst, hvorvidt der var forskel på gamle og nye brændeovnes partikelemissioner opgjort som partikelantal, herunder om, hvorvidt krav om eftermontering af et filter kan sidestilles med udskiftning af en gammel ovn til en ny. Vi kan konkludere at der er forskel på gamle og nye brændeovnes emissionsprofil, idet nye ovne generelt tilskrives en fordeling med flere, mindre partikler end de gamle, og samtidig udleder de nye ovne mindre partikelmasse and de gamle.

Et elektrofilter kan reducere partikelantallet med 90-95% under ideelle forhold (ESP10 filter), men udskiftningen af en gammel ovn med en ny formodes at kunne øge partikelantallet, samtidig med at partikelmassen reduceres. Det sidste ved vi fra trendkurven over målt partikelemission under typeprøverne vist i figur 11, hvoraf det fremgår, at udskiftningen af en ovn fra 2002 med en ny brændeovn i gennemsnit vil reducere den udledte partikelmasse med ca. 50%.



FIGUR 12. Fald i brændeovnes partikelemission som funktion af tid (egne målinger).

Omvendt viser udførte målinger, at partikelfiltres reelle filtreringseffektivitet kan være betydeligt lavere end de i godkendelserne oplyste værdier på 90-95% reduktion af partikelantal og 70-90% reduktion af partikel masse. Se nærmere i afsnit 4, filteres dokumenterede effekt. UBA nævner i deres evalueringsrapport [12] fra 2020, at manglende rensning af et elektrofilter øger risikoen for *re-entrainment* (medrivning) af allerede opsamlet partikelmasse. Det sker, når flager af partikelmasse løsner sig fra skorstensvæggen, og føres ovenud sammen med røggasflowet. UBA oplyser i den forbindelse at medrivning kan være årsag til lokale og forbigående forekomster af negativ filtereffektivitet, altså at der forekommer flere partikler efter filtret end før. Effekten oplyses at påvirke partikelmassen i højere grad end partikelantallet. Observationen

understreger vigtigheden af passende rensintervaller, der afspejler fyringsanlægges brugsintensitet og anlæggets forbrændingskvalitet/partikelbelastning.

Meget indikerer, at partikelfiltre er mere effektive, når de benyttes sammen med kedler frem for brændeovne. Det er måske ikke overraskende, idet flertallet af filtre på markedet er udviklet til brug sammen med kedler, og da kedler generelt afleverer en koldere røggas med lavere indhold af uforbrændte organiske gasser. Der er da også flere indikationer i litteraturen, der peger på, at gamle brændeovne har så høje udledninger af de uforbrændte organiske gasser (OGC) og samtidig en høj røggastemperatur, at det påvirker filtrets effektivitet i negativ retning. Som opsummering kan det slutes, at udskiftningen af en gammel brændeovn med en ny medfører en vedvarende reduktion af den udledte partikelmasse. Dog med risiko for at partikelantallet, særligt antallet af de primære ultrafine partikler samtidig øges, når der måles i skorstenen. Eftermontering af et partikelfilter sænker både den udledte partikelmasse og det udledte partikelantal, men reduktionsgraden vil afhænge meget af anlægstypen og rensintervallerne, og herunder om filtret er selvrensende. Selvom partikelfiltre er mere effektive, når de anvendes sammen med nyere brændeovne end med gamle, kan krav om øget renseshyppighed opveje en del af ulemperne ved drift sammen med gamle brændeovne.

7. Delopgave 6 Model til rensning og vedligehold

Opgaveformulering:

"Der ønskes et forslag til en administrationsmodel for, hvordan filtre i praksis kan renses og skal vedligeholdes, hvis de ikke er selvrensende, herunder forslag til kontrol og håndhævelse af relevant myndighed.

Elektrofilter og skorsten kræver i mange tilfælde regelmæssig rensning for at opretholde funktionen. Ingen af de kendte tyske partikelfiltre er selvrensende, men kræver manuel interaktion, for eksempel rensning af en skorstensfejer. Det dansk fremstillede ESP10 partikelfilter er selvrensende, og gennemgår en rensningscyklus hver 6. time."

7.1 Model til rensning og vedligehold

Blandt de fem filtre, der i delopgave 2 er udpeget som værende egnede til brug sammen med brændeovne, er det kun det danske ESP10 filter, der er selvrensende. De resterende fire filtre skal renses manuelt. Det er vanskeligt at få oplyst realistiske rensningsintervaller, blandt andet da krav til rensning afhænger af de aktuelle driftsbetingelser, som fabrikanten ikke er herre over. Fabrikterne oplyste rensningsintervaller, som svinger mellem dage og op til et helt år.

I certifikaterne på DIBt's hjemmeside er der et afsnit 4.2 'Drift og rensning'. Ud fra disse oplysninger gengives filterfabrikantens anbefalede rensningsintervaller:

- KaminFilterKat skal tilses og renses for hver 40-50 driftstimer. Det opnår man nemt på 1-2 ugers drift i fyringssæsonen, hvilket betyder, at hyppig handling er påkrævet.
- OekoTube skal renses 'regelmæssigt' og uafhængig af brugsmønstret. Rensning af et OekoTube partikelfilter kræver, at en fagperson bevæger sig op på taget og nedtager filterenheden fra skorstenspipen. Se evt. billede af monteret filter i figur 2.
- Airjekt 1 skal renses 'regelmæssigt', dog minimum 4 gange årligt ved normal brug.
- ESP10 skal afmonteres og renses grundigt 4 gange årligt som supplement til den daglige selvrensning på op til tre gange i døgnet.
- Til sammenligning angiver fabrikanten af Morekat filtret at det skal renses for hver 8 timers drift.

Idet flertallet af disse filtre er udviklet til brug sammen med fastbrændselskedler, bliver de udfordrede på flere parametre, når de bruges sammen med brændeovne. Brændeovne, især de ældre brændeovne, afgiver betydelig højere røggas temperatur end kedlerne. Brændeovne kan sagtens komme op omkring de 300-400 grader røggas temperatur, der er oplyst som maksimal driftstemperatur for de fleste filtre.

Brændeovne har også betydelig højere emissioner af de uforbrændte organiske gasser (OGC) end kedlerne (ref UBA [12] afsnit 2.5.1.1 nederst). Derfor kan elektroderne godt blive dækket af en tjæreagtig belægning, der hæmmer funktionen, og risikerer at nedsætte elektrodens levetid. UBA rapporterer om en lignende relation for sod indhold i røggassen, hvilket giver de gamle ovne en negativ bias.

Der er således grund til at formode, at de af fabrikterne oplyste rensningsintervaller, er forudsat af gennemsnitlige eller gode driftsbetingelser, og måske er i underkanten af det nødvendige, når filtrene benyttes sammen med brændeovne.

7.2 Overvejelser om administrationsmodel

Hvis et partikelfilter skal kunne godskrives for den nominelle effektivitet på f.eks. fjernelse af 70% af partikelmassen og 90% af partikelantallet, skal der være vished om, at filtret til stadighed opretholder sin fulde funktion. Det vil derfor efter Teknologisk Instituts opfattelse være påkrævet med regelmæssigt tilsyn og service udført af en fagperson. Da elektrostat filtre arbejder med højspænding, er rensning ikke en funktion, der forsvarligt kan betros ejeren af fyringsanlægget. Tilsynsintervallet kan formodentlig være længere for filtre med automatisk rensning, end for filtre, der udelukkende er afhængige af manuel rensning. Erfaringer fra MUDP-projektet SHREK (MUDP-rapport fra 2021) [13] viser, at ESP10 filtrets effektivitet målt på partikelmasse var faldet fra 94% i begyndelsen til 70% efter 3 måneders drift samme med et pillefyr. Effektiviteten på reduktion af partikelantal var i samme periode faldet fra 90% i begyndelsen til knap 40% i slutningen, til trods for én daglig selvrensning af filtret ved bankning (det maksimale er tre daglige selvrensninger). Virksomheden har efterfølgende modificeret konstruktionen på baggrund af erfaringerne fra SHREK projektet, med henblik på at forbedre langtidsdriftsegenskaberne. I det igangværende Fyrtårnsprojekt, Clean Air Test zone, har to huse fået monteret et ESP10 partikelfilter. Projektet var ventet afsluttet med udgangen af 2022, men fik bevilget forlængelse på seks måneder, for at få hele fyringssæsonen 2022/23 med i projektperioden. De foreløbige resultater har været fremlagt for projektpartnerne, og er blevet inddraget i teksten under delopgave 3 – filteres dokumenterede effektivitet. Projektet afsluttes med udgangen af april måned, og således er databehandling og analyse endnu ikke afsluttet. Der henvises til den kommende projektrapport for Clean Air Test Zone projektet for reduktionssegenskaber målt på de to huse med partikelfilter.

Som allerede diskuteret, forventes drift af et partikelfilter sammen med brændeovne at belaste filtret mere end drift sammen med pillefyr. Hvis filtrets renseshyppighed til gengæld er på de anbefalede maksimale tre automatiske rensninger i døgnet, kan man formode at 3 måneder også er et tilstrækkeligt tilsynsinterval for drift af ESP10 sammen med brændeovne, dog med skyldig hensyntagen til, at en brændeovn ikke bare er en brændeovn, men ovnens alder, brændets beskaffenhed og brugsmønstret kan nødvendiggøre hyppigere tilsyn og rensning.

Idet partikelfiltre er et nyt produkt i brug i private hjem i Danmark, savnes der eksisterende lovgivning, som kan bruges til at regulere tilsynsintervallet. Bygningsreglementet kunne måske bruges til forankring af et krav, skønt håndfaste krav i BR strider mod mange års udvikling hen imod de såkaldte *funktionskrav*. Et kendt eksempel er krav til skorstenshøjde, hvor tidligere krav til skorstens absolutte frihøjde over tag ikke længere indgår, men er erstattet af et funktionskrav om effektiv bortledning af røgen.

Skorstensfejning er reguleret af bekendtgørelse nr. 541 af 22/05/2017 'Bekendtgørelse for brandvænsforanstaltninger for aftrækssystemer og fyringsanlæg'. Det fremgår af §13 af aftrækssystemer, der betjener brændeovne og lignende skal fejles én gang årligt. Det hedder videre i stk. 2, at for særligt belastende fyringsanlæg skal skorstensfejningen fastsættes efter forhandling med ejeren. Det er muligt at denne bestemmelse kan udvides til også at omfatte partikelfiltre, men området ligger i udkanten af Teknologisk Instituts faglige ekspertise, hvorfor Miljøstyrelsen opfordres til at søge afklaret ved Trafik-, Bygge og Boligstyrelsen om mulighederne for at indføre krav om rensinterval af partikelfiltre gennem Bek 541 af 22/05/2017 (Skorstensfejningsbekendtgørelsen).

7.3 Simpel model

Med skelen til udenlandske implementeringsmodeller vurderes det, at en aftale om subsidiering af opsætning af filtre både vil være det mest effektive redskab til hurtigt at fremme frivillig brug af partikelfiltre. Samtidig vil det kunne bruges til at forpligte modtageren af tilskud til at efterleve et nærmere fastsat tilsynsinterval udført af enten virksomheden, der leverer filtrene, eller af den lokale skorstensfejermester eller anden kvalificeret servicevirksomhed.

8. Hovedopgaven Model for godkendelsesordning

Heri opsummeres fund fra delopgaverne ovenfor, hvor det hele samles i overvejelser om en godkendelsesordning.

8.1 Temaer fra litteraturstudiet.

8.1.1 IEA Biomass Task 32 eksperterne skriver i rapporten fra oktober 2022 [18];

” En hindring for at introducere nye filtre eller ESP'er på markedet ses i, at de betragtes som byggevarer, men de har ikke en selvstændig harmoniseret standard, hvilket betyder at overensstemmelse med EU regler ikke umiddelbart kan erklæres ved hjælp af en typeprøve, en ydeevnedeklaration og CE-mærkning af partikelfiltret. Derfor skal en filterproducent gennemgå en tidskrævende og bekostelig individuel godkendelsesproces på nationalt plan for det tyske marked (dvs målinger af effektivitet udført af et akkrediteret måleinstitut og efterfølgende registrering ved det Tyske institut for byggeteknologi - DiBt). Som følge heraf bliver filtre og ESP'er i stigende omfang integreret i nye fastbrændselskedler. De bliver således et funktionelt element i nye kedler i stedet for at være et selvstændigt produkt til eftermontering.”

Fravær af europæisk harmoniserede standarder for partikelfiltre hæmmer det grænseoverskridende eksportsalg, og navnlig salg til de øvrige medlemslande i EU. Tyskland, som har en lang historik af nationale godkendelsesordninger, udgør i kraft af BImSch V forordningen så stort et marked, at de tyske filterfabrikanter har kunne betjene hjemmemarkedet med nationale 'Zulassungs' baseret på enten VDI 3670 normen eller DIN SPEC 33999 præ-standard. Hvis der blev indført krav om brug af partikelfiltre i andre EU-lande, ville der også opstå et marked udenfor Tyskland, som de eksisterende filterfabrikanter sikkert vil rette opmærksomheden mod, og herunder overvinde de vanskeligheder, der måtte være forbundet med at komme ind på de pågældende markeder, når bare potentialet var stort nok.

Der kendes et eksempel fra New Zealand. En importør, som i forvejen solgte europæiske brændeovne, ønskede også at markedsføre OekoTube Outside partikelfiltret. Importøren EnviroSolve Limited søgte godkendelse af filtret ved myndigheden Environment Canterbury Regional Council. Importøren oplyser, at det tog 9 år at opnå en godkendelse af OekoTube filtret, og at årsagen til det lange forløb var, at han skulle dokumentere filtrets effektivitet efter den New Zealandske målemetode for brændeovne. De benytter en fortyndingstunnel baseret metode, ligesom vi kender princippet fra Norge og USA. Godkendelsen rummer krav om, at filtret skal reducere partikelmassen med mindst 67% til en resulterende partikelemission på maksimalt 0,5 g/kg, når der benyttes brænde med op til 25% fugtindhold. Ligeledes kræves filtret monteret og tilsluttet af en fagmand, og forudsætter endvidere indgåelse af en kontrakt om rensning og vedligehold af importøren mindst årligt.

Systemintegration har længe fundet sted mellem kedler og ESP'er. Det reducerer den samlede system pris, og det letter rengøring af filtret. For brændeovne er systemintegrations med elektrofiltre ikke rigtig slået igennem endnu, og det er et åbent spørgsmål om det vil ske grundet elektrofiltrernes begrænsede virkning overfor gasser. Tyske HARK og LEDA har ovne med indbygget dybdefilter af svampetypen, og i amerikanske brændeovne er indbyggede katalysatorer mere udbredte for at ovnene kan klare de strenge partikelkrav på 2 gram i timen, samtidig med at emissionen af CO skal være lav og virkningsgraden på over 75%. På den nyligt overståede fagmesse for brændeovne, World of Fireplaces i Leipzig, viste CONTURA en planche af en brændeovn med indbygget elektrofilter, hvorfor det er muligt, at de tidligere beskrevne barrierer for indbygning af elektrofiltre i brændeovne er ved at blive overvundet.

For de fem godkendte Blauer Engel brændeovne (alle fra Tyske fabrikker) er ESP'en stadig en separat komponent til placering på skorstenen. Egentlig indbygning af en ESP i en brændeovn er nok mindre realistisk. Røggassen er stadig meget varm inden den forlader ovnen og mange forbrændingsprodukter ville kunne passere ESP'en i gasform. Effektiviteten øges ved at placere ESP'en så langt fra ovnen, at gasserne har nået at udkondensere til partikler, inden de rammer ESP'en. Derimod er det mere sandsynligt, at indbygning af katalysatorer eller dybdefiltre vil blive mere udbredt i europæiske ovne ift. det, vi ser i dag. Det skyldes, at katalysatorer modsat elektrofiltret fungerer bedst ved høj røgstemperatur. Desuden er en katalysator betydeligt billigere i anskaffelse end et elektrofilter. Endelig er der de senere år kommet nye typer katalysatorer på markedet, som er mere robuste end tidligere keramiske katalysatorer, og som ikke medfører noget større tryktab i systemet. En brændeovn, der er afhængig af naturligt træk, tåler ikke ret meget tryktab i røgvejen. Omvendt vil brug af en røgsuger kunne opveje tryktabets negative indflydelse.

8.1.2 Universitet STUTTGART skriver i sammenfatningen af undersøgelsen 'Methodisches bewertung von Sekundärmassnahmen für kleine Biomassefeuerungen' 2017 [10]

"Da der på grund af de beskrevne vanskeligheder for anvendelse af reduktionstiltag i form af separatorteknologier ikke kan forventes hurtige løsninger, bør fremtidige finansieringstiltag også understøtte om videreudviklingen af forbrændings- og reguleringsteknologi (f.eks. gennem en CFD - Computational Fluid) Dynamik - understøttet udvikling og gennem brug af røggassensensorer, f.eks. en lambdasonde) fører også til de ønskede emissionsreduktioner. Men for at bringe sådanne løsninger på markedet og igangsætte udbredt brug er det nødvendigt at skabe passende incitamenter for implementering, anvendelse og markeds lancering af disse teknologier, således at den øgede udviklingsindsats og eventuelt højere produktomkostninger ikke fører til tab af konkurrenceevne"

Nogle af de vanskeligheder, forfatterne sigter til, er et elektrofiltres svingende effektivitet, afhængig af anlægstype og driftsforhold.

"Udviklingen af brændeovne med integrerede elektrostatiske filtre er endnu ikke klar til markedet.

Elektrofiltre til brændeovne er indtil videre kun udviklet som eftermonteringsenheder. Graden af massereduktion af denne enhed afhænger af støvkonzentrationen i råggassen og spænder fra lidt over 10 % (med høje støvbelastninger i råggassen) til over 60 % (med lave røggaskonzentrationer)."

8.1.3 UBA skriver om elektrofilter teknologien, dens virkemåde og begrænsninger i Evalueringen af 1. BimSch V forordningen i 2020 [12]

"Med undtagelse af CCA- og ESP10 bruger de øvrige elektrofilter indersiden af skorstenen som en separationselektrode. Da denne konstant udsættes for røggassen, er risikoen for medrivning af større klumper af partikelmasser stor. Medrivning er løsningen af og genintroduktion af allerede opsamlede partikler fra separationselektroderne ind i røggasstrømmen inde i den elektrostatiske støvopsamler.

De kraftige udsving og stedvis negative separationseffektiviteter tilskrives bl.a. medrivning der fører til en betydelig udhulning af masseseparationseffektiviteten, hvorimod antalsreduktionen kun påvirkes i mindre grad. Hyppigere rensning af elektrodens og filtrets indvendige flader, der gør at lagtykkelsen af opsamlet partikelmasse ikke bliver så stor, ville kunne reducere de negative konsekvenser af medrivning.

Regelmæssig rengøring (f.eks. bankning, skylning) kan reducere eller stort set forhindre medrivning. Det er dog vigtigt, at støvet opsamles under renseprocessen og ikke slipper ud i miljøet med røggasstrømmen.

I mange undersøgelser blev der fundet en afhængighed mellem filtrets udskilningsgrad og støvkonzentrationen og støv egenskaberne.

I princippet gælder det, at jo højere partikelkonzentrationen er i røggassen, des lavere er elektrofiltrets udskillelseeffektivitet. Ved nærmere eftersyn er det primært partikelantalkonzentrationen i røggassen, der påvirker elektrofiltret. Separatoren skal kunne nå

at oplade partiklerne medens de passerer gennem det elektriske felt. Dette felt genereres mellem højspændingselektroden og modpolen, i de fleste tilfælde skorstensvæggen. Feltets styrke afhænger blandt andet af elektrodenes udformning og længde og den påførte højspænding. Sidstnævnte kan ikke øges i det uendelige. På et tidspunkt opstår der spændingsoverslag, og feltet kollapse. Hvis der er mange ladede partikler mellem højspændingselektroden og modpolen, svækker disse også det elektriske felt, da de danner et modpotentiale. I ekstreme tilfælde dannes der ikke flere frie ladningsbærere ved højspændingselektroden, nye partikler kan ikke længere oplades, og separatoren mister sin effektivitet.

Støvsammensætningen har også indflydelse på filtrets effektivitet. Normalt er andelen af kulstof i støvet af i røggassen fra en brændeovn (mindre gunstig forbrænding) højere end i støvet i røggassen fra en pilleovn eller et pillefyr (optimal forbrænding). I et undersøgt tilfælde var andelen af uforbrændte organiske forbindelser (OGC) i røggassen fra en pilleovn kun 1,3 %. Støvet fra røggassen fra en brændeovn havde en andel af uforbrændte organiske forbindelser (OGC) på 41 %.

Separationseffektiviteten bestemt for de undersøgte partikelfiltre var mellem 75-90% for pilleovne eller pillefyr, men 50-90 % for brændeovne efter fabrikanternes oplysninger. I mange tilfælde øger de uforbrændte organiske forbindelser (OGC) vedhæftningen af støvet til elektroderne og isolatorerne og kan derfor føre til en reduktion i filtrets effektivitet eller endda til svigt af elektrofiltret.

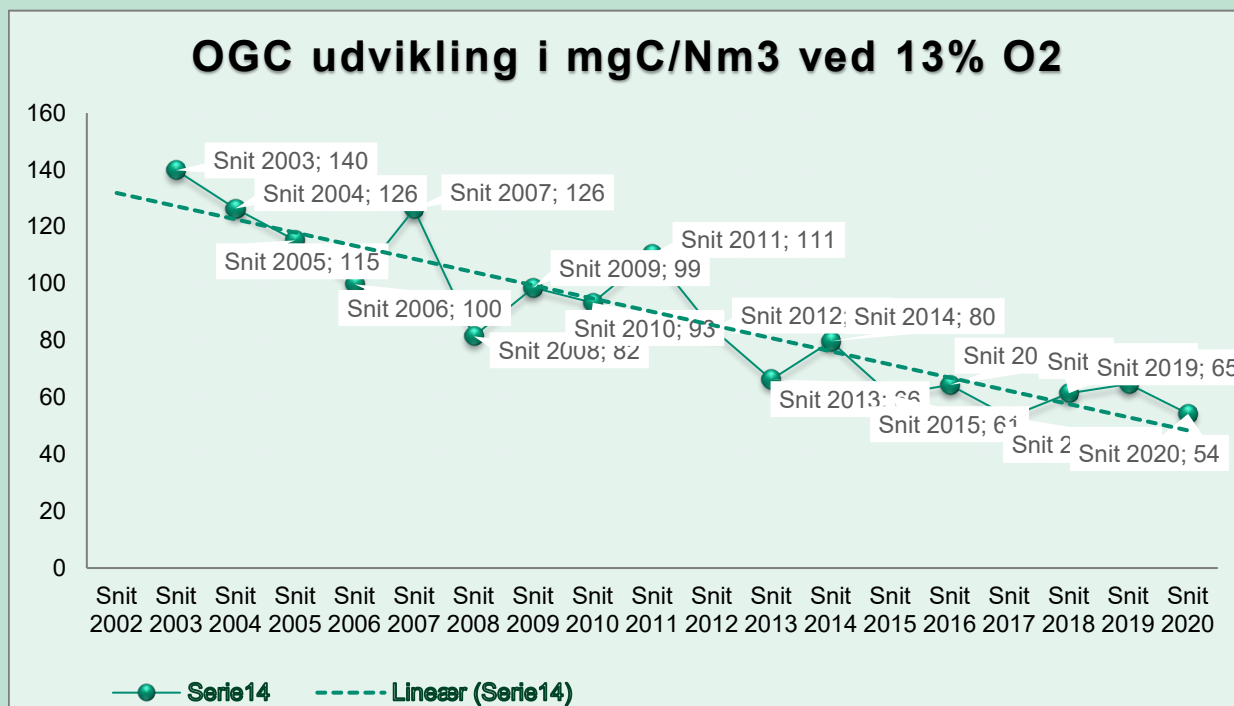
Et øget sodindhold fører ligeledes til et fald i separationseffektiviteten. Sod (Black Carbon) har en høj elektrisk ledningsevne fordi den består af kulstof, således at der efter partiklernes kontakt med separationselektroden sker en hurtig elektrisk reaktion, og der dannes sekundære mindre partikler, som så hurtigt kan frigives og føres ud med røggasstrømmen"

8.2 Dokumentation af langtidsegenskaber

Flere faktorer kan påvirke et elektrofilters langtidss stabile drift. Filtrene er primært udviklet til drift sammen med kedler, hvilket betyder, at når teknologien overføres til brændeovne (Exodrafts ESP10 generelt undtaget) vil både røggassens sammensætning og røggastemperaturen have negativ indflydelse på langtidsegenskaberne. Men selv ESP10 filtret kan blive udfordret, hvis det bruges sammen med en brændeovn, der har høje udledninger af OGC. Hvor ældre brændeovne generelt har højere emissioner af OGC end de nye, kan høj emission af OGC også forekomme i en nyere ovn, der betjenes uhensigtsæssigt. Påfyring af brændemængder større end fabrikantens vejledning foreskriver, og fyring med brænde, der ikke er tilstrækkeligt tørt, vil hver især føre til høje eller meget høje emissioner af OGC.

Teknologisk Institut udfører andre typer af prøver, der bedømmer langtidsegenskaber, f.eks. for industrilakerede emner eller anden overfladebehandling, man kan sætte ud i det fri og lade prøveemnerne påvirkes af vejr og vind i seks måneder eller mere. Individuel prøvning af et elektrofilters langtidsegenskaber vil derimod være mere måletunge og kræve ugers målinger i laboratoriet. Måske endda gentagne forløb, hvis filtret skal prøves sammen med to eller flere alderskategorier af brændeovne, hvilket vil kunne gøres efter opstilling af et måleprogram, der tager højde for de ønskede behov for viden.

Herunder ses en figur, der viser udviklingen i emission af OGC målt under typeprøverne i tiden 2002-2020. Til prøverne fyres ovnen med træ med fugtindhold indenfor 12-18% efter standardens krav og med en (lav) brændemængde bestemt af fabrikanten. Man må nok regne med at virkelighedens emissioner af OGC er noget højere, når forbrugerne fyrer med det brænde de har liggende i stakken, og fylder mere træ på ovnen, end vejledningen angiver.



FIGUR 13. OGC emissioner fra brændeovne som funktion af alder målt under typeprøver ved Teknologisk Institut.

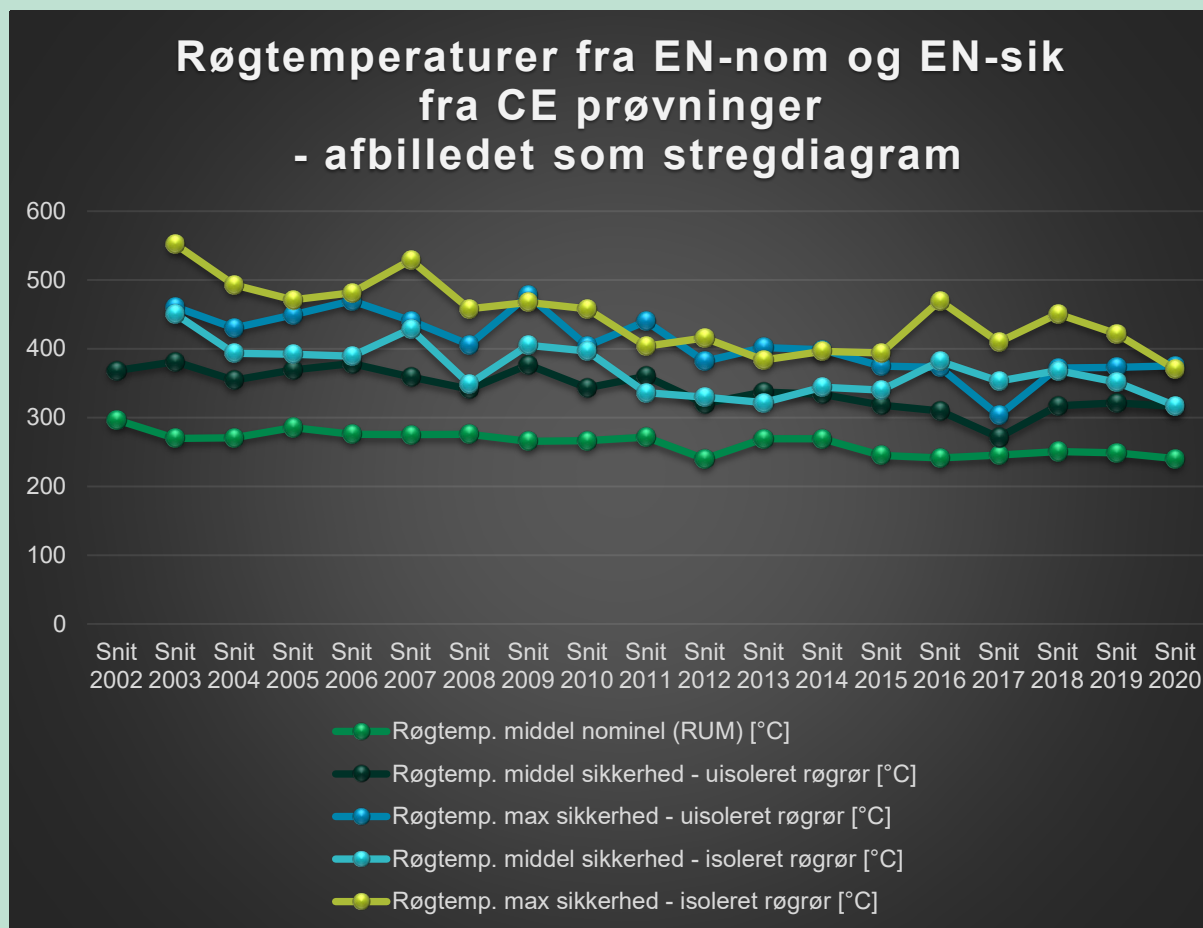
Til sammenligning har automatisk pillekedel emissioner af OGC, der mindst er en dekade lavere.

Derfor står spørgsmålet tilbage om, fra hvilken alder ovnens OGC emission bliver så høj, at den kan forventes at påvirke elektrofilterets effektivitet så meget, at der vil kræves hyppigere rensning af filtret. Dette bør undersøges nærmere og indgå i overvejelserne om, hvorvidt anbefaling af eftermontering af filter er at foretrække, frem for at udskifte ovnen med en ny.

8.3 Særlige forhold når et elektrofilter bruges sammen med en gammel brændeovn

Ved brug sammen med en ældre brændeovn, må man forvente lavere filtreringseffektivitet. Elektrofiltere er for langt de fleste filteres vedkommende udviklet til brug sammen med kedler (ESP10 som undtagelse). Ældre brændeovne vil generelt belaste elektrofilterets drift mere end nye brændeovne, da de dels har højere partikkelkoncentrationer og uforbrændte organiske gasser i røggassen, og dels har højere røggastemperatur. Elektroderne er specificeret til at kunne holde til ca. 300-400 grader, hvilket er rigeligt til kedler, men bestemt indenfor rækkevidde for især de ældre brændeovne afhængig af, hvordan ovnen bliver betjent. Hyppigere rensning af filtret vil til dels kunne opveje den ekstra belastning, som gamle brændeovne udgør.

Figuren herunder viser målte røgstemperaturer for brændeovne testet ved Teknologisk Institut i tidsrummet 2002-2020. Den nederste mørkeblå kurve er middeldrøgstemperatur målt under ydelsesprøven. De øvrige er middeldrøgstemperaturer målt under sikkerhedsprøverne for de maksimalt målte temperaturer, altså med spjældet helt åbent og med anvendelse af en større brændemængde end til ydelsesprøven. Temperaturerne fra sikkerhedsprøverne er vist både med almindeligt uisoleret røgrør og med isoleret røgrør. Begge scenarier vises som hhv. maksimal røgstemperatur og middeldrøgstemperatur.



FIGUR 14. Røgtemperaturer fra brændeovne målt under typeprøve til CE-mærke.

Først for nyligt har begge sæt temperaturer bevæget sig ned under de 400 grader. Det skyldes primært at de nye ovne ikke har så stort spjældareal, som de gamle havde, og derfor ikke tilfører så meget luft til forbrændingen.

Dette forhold stiller krav om øget rensningshyppighed for, at drift af et partikelfilter sammen med de ældre brændeovne vedvarende har en høj effektivitet - med henvisning til tilopgaveformuleringens forbehold om de ældre brændeovne:

”Det er afgørende, at ældre brændeovne kun undtages fra nedlæggelse eller udskiftning i ejerskifteordningen såvel som kommende kommunal mulighed for at forbyde ældre brændeovne, såfremt der sikres en høj og varig miljøeffekt af en filterløsning, der mindst matcher effekten af udskiftning”

Forholdet og mulige afgrænsninger er behandlet herunder i 'Dokumentation af langtidsegenskaber'.

Man kan sammenfatte udfordringerne ved at opbygge en dansk godkendelsesordning til tre hovedtemaer:

- 1) Sikring af langtidseffektivitet når filtret bruges sammen med brændeovne
- 2) Det lave antal af filterfabrikanter i Danmark, som kunne tænkes at efterspørge godkendelse
- 3) Fravær af en harmoniseret europæisk standard til test af partikelfiltre (CE-mærkning)

Især de to sidste temaer kunne afhjælpes ved en dansk blåstempling af de filtre, der allerede er godkendt i Tyskland.

8.4 Kritisk volumen i en godkendelsesordning

Hvis der skal udarbejdes en national godkendelsesordning med individuelle godkendelsesvilkår, eller en Europæisk standard længere ude i fremtiden, vil det være gavnligt med opbakning fra en samlet branche med et vist volumen. Til sammenligning er de europæiske brændeovnsfabrikanter ret velorganiserede med nationale brancheforeninger, der arbejder op imod et hierarki af europæiske brancheorganisationer, DAPO, HKI, CEFACD til eksempel. Hidtil kendes kun én moden industriel producent af partikelfiltre i Danmark, nemlig firmaet Exodraft, der har sin teknologiske base i udvikling og salg af røgsugere. Teknologisk institut har tidligere været i kontakt med endnu en mulig producent, Proces Sander Aps, der har patenteret et posefilter til røggasrensning af brænderøg. I en case story fra Erhvervshus Sjælland, der har støttet produktmodningen af filtret gennem puljen Green Change Zealand, oplyses det, at filteret 'Sander Smoke Cleaner' forventet introduceret på markedet i efteråret 2022. Proces Sanders hjemmeside er tilsyneladende senest opdateret i 2021, hvor det oplyses, at en fritstående produktionsmodel af filtret er under fremstilling, og forventes udsat for feltforsøg i den nærmeste fremtid.

8.5 Europæisk standard eller ej

Som allerede berørt findes der ikke en harmoniseret europæisk standard for partikelfiltre. Derfor er det indtil videre overladt til medlemslandene at fastsætte nationale krav og prøvningsmetoder. Hvis der opstår flere markeder for partikelfiltre, ud over Tyskland og Schweiz, vil industrien formodentligt selv tage initiativ til udarbejdelse af en europæisk standard, for derved at reducere deres omkostninger til test og godkendelse af partikelfiltre.

8.6 Overvejelser om modeller for godkendelsesordning

I den simpleste form udarbejder Miljøstyrelsen sammen med relevante interessenter en kravspecifikation for, hvad et filter skal kunne, og hvordan egenskaberne skal måles og dokumenteres.

Fabrikanter, der ønsker deres partikelfiltre godkendt, lader dem typeprøve på et anerkendt prøvningsinstitut, og får en rapport, der dokumenterer filtrets egenskaber. Ovenpå den grundmodel kan der kobles flere lag, som giver yderligere sikkerhed for filtrets funktion og produktionens ensartethed. Der kan indgå en løbende kontrol, hvor en inspektør besøger fabrikanten eksempelvis årligt og kontrollerer, at produktionen af filtrene fortsat sker efter specifikationerne, samt at interne tests og kvalitetskontroller udføres og dokumenteres. Endelig kan der fastættes en certificeringsordning som ekstra uvildig sikkerhed. Hvis der ønskes en certificeringsordning tager Miljøstyrelsen sammen med et certificeringsorgan og eventuelle interessenter initiativ til udarbejdelse af et sæt certificeringsbestemmelser. Certificeringsbestemmelserne kan eksempelvis indeholde krav til kvaliteten af de anvendte materialer, personalets kvalifikationer og uddannelsesniveau, hyppighed af fabrikantens interne kontroller, krav om tilsyn med produktionen og ultimativt krav om gentagende prøvning af filtret.

Kravniveauet kan hæves yderligere ved at forlange akkreditering af overensstemmelsesvurderingen, tilsyn og certificering ved DANAK.

I forhold til de sidste to elementer, certificering og akkreditering, vil der typisk kræves et stærkere grundlag end bare en kravspecifikation, for at de to greb reelt bidrager med øget sikkerhed. Der bør foreligge enten en branchestandard eller endnu bedre en dansk eller europæisk standard for partikelfiltre.

Hvis man ønsker at gå den vej, er der flere andre typer af overensstemmelsesvurderingsvirksomheder, der kan inddrages, eksempelvis et certificeringsorgan til at drive en certificeringsordning eller en ETA organisation (European Technical Assessment) til at drive selve godkendelsesordningen. Den danske akkrediteringsfond DANAK har fortegnelser over godkendte målelaboratorier, tilsynsorganer og certificeringsorganer.

En godkendelsesmodel med stigende kravniveauer, som beskrevet ovenfor, svarer til hierakiet i den europæiske AVCP model for overensstemmelsesvurdering af byggevarer. AVCP står for attestation og verifikation af byggevarens konstante ydeevne. For yderligere oplysninger om godkendelse af byggevarer henvises til Trafik-, Bolig- og Byggestyrelsen vejledning 'Kend din Byggevare' [19].

Til sammenligning indgår Teknologisk Institut i en national og overnational godkendelsesordning af vandhaner, armaturer og komponenter til brug i vandforsyningsanlæg, VA-ordningen benævnt. Ordningen er begrundet i særligt skandinavisk ønske om at beskytte vore drikkevand og sikre, at vandet ikke bliver forurennet eller degraderet på sin vej ud til forbrugerens aftapningssteder. VA-ordningen er baseret på flere nationale og nordiske standarder. ETA-Danmark er sekretariat for ordningen, og de modtager ansøgninger fra virksomheder, og administrerer mærker og kontrolaftaler. Læs evt. mere om VA-ordningen her: <https://www.etadanmark.dk/da/va/hvad-er-en-va-godkendelse>

Ovenpå VA-ordningen kan der kobles en certificering. Certificeringsordningen DK-Vand er grundlagt af Teknologisk Institut, plastrørsbranchen i Danmark og vandforsyningselskaberne. Ordningen administreres af certificeringsvirksomheden DANCERT. Læs evt mere om DK-Vand certificeringsordningen her: <https://dk-vand.org/om-dk-vand/om-dk-vand/>

Der kendes andre eksempler på nationale danske godkendelsesordninger, som MK-ordningen for byggematerialer. MK-ordningen eksisterer stadig selvom mange byggematerialer har fået egne harmoniserede standarder, og er CE-mærkede. En godkendelse gælder for tre år ad gangen, hvorefter den skal fornyes. Som eksempel på det modsatte, er stålskorstene gledet ud af MK-ordningen efter, at der udkom en harmoniseret europæisk standard for stålskorstene i 2009. <https://www.etadanmark.dk/da/mk/hvad-er-en-mk-godkendelse>

Et andet kendt eksempel på en national eller regional godkendelsesordning er godkendelsesordningen for landbrugsteknologier, luftrensning og -monitorering, jord- og grundvandsrensning og monitorering og renere produktion og processer generelt. Ordningen er baseret på et samarbejde mellem Danmark, Holland og Tyskland, der i fællesskab har udviklet de såkaldte VERA testprotokoller. Producenter, der ønsker at få deres miljøteknologier optaget på Miljøstyrelsens liste, henvender sig til ETA Danmark, fremlægger dokumentation for udførte tests, hvorudfra ETA Danmark skriver en indstilling til Miljøstyrelsen. Læs mere om ordningen her: <https://mst.dk/erhverv/landbrug/teknologilisten/>

En del nationale godkendelsesordninger opstår, og lever typisk i nogle år, hvorefter de glider ud af brug igen. Det kan eksempelvis skyldes udgivelse af harmoniserede standarder og tilhørende CE-mærkning eller nye EU direktiver, der overstyrer medlemslandenes muligheder for at opretholde nationale krav.

8.7 Muligt indhold af en dansk godkendelsesordning for partikelfiltre

I relation til en mulig dansk godkendelsesordning for partikelfiltre vil det være oplagt at indbygge minimumskrav til reduktion af partikelmasse og partikelantal, krav til langtidsstabil drift, gerne krav om selvrensning og krav om deklaration af anvendelsesområder efter type og alder af fyringsanlæg. Man bør også overvejes at seke til den tyske godkendelsesordning, der baserer sig på en særlig målesekvens, der indeholder både optænding, fyring ved nominel ydelse og fyring ved lavlast, samt krav om reduktion af udledningen af partikelmasse efter VDI 3670 normen, og til Blauer Engels krav om reduktion af partikelantal efter præ-standard DIN SPEC 33999. Det bør overvejes hvilke kravniveauer en ordning skal rumme i relation til ønsket tilslutning og udbredelse, som ordningen forventes at opnå. Hvis der fra starten fastsættes meget høje krav til filternes effektivitet, kan man forvente tilslutning fra de mest effektive teknologier. Til gengæld bliver udvalget måske begrænset, ligesom høje krav også kan bevirke en prissætning, der begrænser markedets efterspørgsel efter produkterne. Som alternativ til meget høje indstigningskrav kan en trindelt model overvejes. Trindelingen kan enten bestå i at de godkendte partikelfiltre rangeres i f.eks. 3 klasser A, B og C med faldende krav til effektivitet. Trindeling kan også ske ved at fastsætte ret lave indstigningskrav, der opstrammes over en

årrække. Derved kan flere fabrikater og filtermodeller blive repræsenteret fra begyndelse, og der vil ske en udskillelse over tidsamtidig med, at fabrikater, der ønsker at forblive på listen, stimuleres til fortsat teknologiudvikling.

BE godkendelsesordning for brændeovne er et kendt eksempel på en ordning med meget høje kravniveauer. For at en ovn kan blive godkendt, kræves det, at den både har automatisk luftregulering, en indbygget katalysator, og den skal være godkendt sammen med et specifikt elektrofilter, ligesom der også kræves en elektronisk driftstimetæller. Tilsammen bevirker disse krav at en BE ovn bliver mindst dobbelt så dyr i anskaffelse som en moderne brændeovn. Der kendes i øjeblikket fem BE godkendte brændeovne, men som tidligere diskuteret formodes salget indtil videre temmelig begrænset. Dog fremstår ovnene som et bevis på, at industrien godt kan realisere brændeovne med betydeligt lavere emissioner, når de giver afkald på konceptet om at en brændeovn er en relativ lavteknologisk opvarmningsteknologi, der skal kunne fungere uanset om der er elektrisk strømforsyning til stede.

Indtil de europæiske energimærker blev pligtige, var der trindelte mærkninger af køleskabe efter energiklasse og indikeret med et symbol, der kunne være grønt, gult eller orange. Samme trindelte metodik er videre ført i de europæiske energimærker.

Det franske Flamme Verte miljømærke for brændeovne er et andet eksempel på en trindelt model for kravniveau med tildeling af tre til syv stjerner alt efter ydelse. Flamme Verte er fra 2022 gået et skridt videre, og har indført krav om, at brændeovne, der udtages til kontrolmåling, også skal have målt deres emissionsegenskaber og virkningsgrad ved lavlast. Til den europæiske typeprøve kræves der ellers kun målinger ved nominel ydelse. Krav i lavlast er med til at aftegne et bredere spektrum af en ovns forbrændingsegenskaber, og gode lavlast egenskaber er et væsentligt kvalitetsparameter for en brændeovn. Flamme Verte indfører kravet over seks år, således der skal måles lavlastegenskaber fra 2022. Fra 2025 skal brændeovnsfabrikaterne deklarere en ovns lavlastegenskaber, og fra 2028 indføres grænseværdier for lavlastegenskaber. Igen et eksempel på en trindelt kravoptrapning, der stimulerer fabrikaterne til teknologiudvikling.

8.8 Yderligere optioner

Hvis industrien også vægter at fremme eksportmuligheder trods fravær af harmoniserede standarder, kan der som option udarbejdes en europæisk teknisk vurdering (ETA) godkendelse, der er baseret på et europæisk vurderingsdokument (EAD). Kombinationen af en EAD og en ETA svarer til en grundlæggende typeprøve, der kan give adgang til CE-mærkning. En EAD kan sidestilles med en harmoniseret standard, og den skal af kommissionen offentliggøres i EU tidende, inden den er gældende. Proceduren for udarbejdelse af en EAD fremgår af byggevareforordningens (EU nr 305/2011) artikel 21 og videre i forordningens bilag II.

Redskabet 'verifikation af miljøegenskaber' (ETV) skal også kort omtales. En ETV har til formål at sikre, at den miljøeffekt, som en producent anpriser for sin teknologi, reelt også opnås. Det sker ved, at verifikationen gennemføres af et uvidt verificationsorgan med en høj faglig kompetence, og på den måde sikrer ETV'en høj troværdighed ved teknologiens miljøeffekt. De landbrugsteknologier, der tidligere er nævnt i relation til Miljøstyrelsens liste, har fået verificeret deres miljøegenskaber ved hjælp af en ETV.

8.9 Mulige udfordringer for en national godkendelsesordning

EU udsendte i 2019 forordning EU 2019/515, der forpligter medlemslandene til at fremme det indre marked ved gensidig anerkendelse af varer, der lovligt markedsføres i et andet medlemsland. Myndighederne i Danmark vil med fordel kunne orientere sig efter den forordning, inden en ny eksklusiv national godkendelsesordning for partikelfiltre lanceres. Af forordningens recital 3 fremgår det "Der kan ulovligt skabes hindringer for den frie bevægelighed for varer mellem medlemsstaterne, hvis en medlemsstats kompetente myndighed i mangel af EU-harmoniseringsregler for varer eller visse aspekter af varer anvender nationale regler på varer, som markedsføres lovligt i en anden medlemsstat, og i henhold til hvilke af varerne skal opfylde visse tekniske forskrifter f.eks. hvad angår betegnelse, form, størrelse,

vægt, sammensætning, præstation, mærkning eller emballage. Anvendelsen af sådanne regler på varer, der markedsføres lovligt i et andet medlemsland, kan være i modstrid med artikel 34 og 36 i traktaten om Den Europæiske Unions funktionsmåde (TEUF), selv hvis disse regler finder anvendelse på alle varer uden forskelsbehandling". Partikelfiltre er et eksempel på byggevarer, der endnu ikke har fået deres egen harmoniserede standard, men som sælges på baggrund af nationale godkendelsesordninger. Det forhold taler også til fordel for at forsøge at opnå en gensidig anerkendelsesordning mellem Danmark og Tyskland.

9. Anvendt litteratur

- [1] 2010 – TFZ rapport nr 23 Bewertung Staubabscheider für Einzerfeuerungstätte.
- [2] 2010 – UBA 1. BImSch V Federal German Immission Control act
- [3] 2011 – MST MP 1393 Force, AAU, TI
- [4] 2011 – IEA Task32 Survey
- [5] 2012 – FHNW Folien FG Leipzig Bestimmung von Abscheridergrad ..
- [6] 2014 – MST MP 1621 MiljøKAT
- [7] 2015 – MST MP 1705 PHX Forprojekt
- [8] 2015 – DBFZ Staubabscheider in Häuslichen Feurungen
- [9] 2016 – Kommerciel anonym måling af ESP-filter (ikke offentlig)
- [10] 2017 – Universität Stuttgart Metodische Bewertung von Sekundärmaßnahmen ..
- [11] 2020 – Blauer Engel DE-UZ 212 Wood stoves award criteria
- [12] 2020 – UBA Evaluation of the 1st BImSch V
- [13] 2021 – MST SHREK MUDP rapport
- [14] 2021 – DUH Keiner Ofen ohne Filter
- [15] 2022 – FHNW Projekt Sass-Fee Schlussbericht
- [16] 2022 – MST CAT projekt – igangværende
- [17] 2022 – Blauer Engel DE-UZ 222 Particle filter award criteria
- [18] 2022 – IEA Bioenergy Task 32 Inventory of national strategies for reducing the impact on Air Quality
- [19] 2016 – Kend din Byggevare, Trafik-, Bygge og Boligstyrelsen 2016
- [20] 2022 – Health impact of air pollution in Europe
- [21] 2023 – Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM) von 16. Sept 2021
- [22] 2021 – Luftkvalitet 2021, DCE Miljø rapport SR533

10. Forkortelser

OEM – Original Equipment Manufacturer
TFZ – Technologie und Förderzentrum
UBA – Umwelt Bundesansamt
IEA – International Energy Agency
DBFZ – Deutsches Biomasse Forschungszentrum
DUH – Deutsche Umwelthilfe
FHNW – Fachhochschule Nordwestschweiz
DIBt – Deutsche Institut für Bautechnik
BImSchV – Bundesimmissionsschutzverordnungen
ESP – Electrostatic Precipitator (elektrostatfilter)
PM – Particulate mass
VOC – Volatile Organic Compounds
OGC – Organic Gaseous Carbon
SMPS – Scanning Mobilty Particle Sizer
CPC – Condensing Particle Counter
EPA – (US) Environmental Protection Agency
DIN – Deutsches Institut für Normung
VDI - Verein Deutscher Ingenieure
LRV – Luftreinhaltung Verordnung
nm – nanometer
POA – Primary Organic Aerosols
SOA -Secondary Organic Aerosols
CxHy – Hydrocarbons
CH4 – Metan
EAD – European Assessment Document
ETA – European Technical Assessment
ETV – Environmental Technology Verification

Analyse og model for etablering af uafhængig godkendelsesordning for partikelfiltre til brændeovne

Rapporten er bestilt af Miljøstyrelsen som en ajourført status- og teknologiopgørelse over eksisterende partikelfiltre af typen elektrofilter (ESP) i Danmark og i Europa, deres virkemåde, driftsforhold og erfaringer fra brug i udlandet. Undersøgelsen kan ses som en opdatering af Miljøprojekt 1393 fra 2011, 'Test of technologies for flue gas cleaning and combustion improvement for existing residential wood burning appliances', udarbejdet af FORCE Technology m.fl. med Ole Schleicher som projektleder. Undersøgelsen i 2011 omfattede flere forskellige røggasrensningsteknologier, inklusiv både passive teknologier og aktive teknologier, som elektrofilter. Dengang var konklusionen, at elektrofilter ikke ydede nogen signifikant effekt på partikelemissioner, men påviste en tydelig reducerende effekt på udledningen af sod. Derimod kunne der ikke påvises nogen målbar effekt på udledningerne af de uforbrændte organiske gasser.

Selvom undersøgelsen primært drejer sig om elektrofilter, indgår der også en kort omtale af muligheder for optimering af forbrændingskvaliteten, samt andre mulige reduktionsteknologier som katalysatorer og brug af automatisk spjældautomatik.

Formålet med denne undersøgelse er at undersøge virkningen af den mellemliggende teknologiudvikling, samt gengive erfaringer med praktisk brug af elektrofilter, primært i Tyskland. Brug af partikelfiltre kan reducere partikelemissionen lokalt, når filterne anvendes sammen med nye ovne, og i særdeleshed når de anvendes sammen med ældre brændeovne. Partikelfiltrer ses derfor som et virkemiddel, der kan substituere krav om udskiftning af en brændeovn eller tillade fortsat brug af brændeovne i lav-emissionszoner.

Den anvendte metode har primært bestået af litteraturstudier suppleret med egne målinger og oplysninger fra nøglepersoner i Teknologisk instituts faglige netværk i Europa.

Rapporten anbefaler at arbejde videre mod en godkendelsesordning af partikelfiltre, gerne i samarbejde med andre lande i Europa. Her er Tyskland er længst fremme, og det vil være oplagt at søge et samarbejde med de tyske miljømyndigheder herom. Rapporten konkluderer, at elektrofilter siden den første undersøgelse i 2011, hvor teknologien stadig var i sin vorden, har udviklet sig til industrielt modnede produkter. Heraf har flere været i mange års praktisk brug i Tyskland i kraft af deres BimSch V ordning, der indeholder krav om regelmæssige feltmålinger af installerede kedelanlæg. Senest har en dansk fabrikant lanceret et elektrofilter med en lovende selvrensningsteknologi og en indbygget røgsuger, som tilskrives gode anvendelsesmuligheder sammen med brændeovne i Danmark."



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk