



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Regulering og overvågning af brændefyring med ny IR-fyringssensor

Miljøprojekt nr. 1461, 2013

Titel:

Regulering og overvågning af brændefyring med ny IR-fyringssensor

Redaktion:

Sønnik Clausen, Danmarks Tekniske Universitet, KemiTeknik
Mads Demenikov, Danmarks Tekniske Universitet, KemiTeknik

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

År:

2013

ISBN nr.

978-87-92903-83-9

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
Konklusion og sammenfatning	5
Summary and Conclusion	6
1. Introduktion	7
1.1 Baggrund.....	7
1.2 Formål	7
1.3 Forventede miljømæssige effekter og vurdering af markedspotentiale	7
1.4 Tilskyndelseeffekt.....	8
1.5 Rapportens opbygning.....	8
2. Litteraturstudie af spektroskopi til måling af CO	9
2.1 Kort om spektroskopi og CO	9
2.2 Absorbtionsspektroskopi.....	10
2.2.1 Med Fourier Transform og simpel IR kilde	10
2.2.2 Med filter og simpel IR kilde	11
2.2.3 Med IR laser kilde	11
2.3 Excitationsspektroskopi	13
2.3.1 Med UV buelampe	13
3. Idé og princip	14
Princippet bevist	15
3.1 Målinger på Teknologisk Institut.....	15
3.2 Tilsmudsning af vinduer.....	18
4. Prototype	21
Referencer	23

Forord

De fleste danske brændeovnsproducenter har baggrund i smedeb Branchen, og har opnået stor succes igennem et moderne design og besparelser på folks varmebudget. Brændeovne er løbende blevet forbedret teknisk, men det er først i år, at den første brændeovn med aktiv regulering er kommet på markedet. En aktiv reguleret brændeovn er den bedste vej frem for at minimere emission af skadelige stoffer vurderes det af både DTU KT (Danmarks Tekniske Universitet, KemiTeknik) og TI (Teknologisk Institut). Dette kræver som minimum at røggastemperaturen og ilt eller CO₂ måles løbende.

Der vil primært være en gevinst i form af forbedret luftkvalitet i byområder med brændeovne med denne teknologi, hvilket dog også står højt på listen mht. at reducere forurening fra sundhedsskadelige partikler i Danmark, Tyskland, etc. Dette projekt belyser ikke sammenhængen mellem udledningen af CO og partikler ved forskellige forbrændingsfaser ved afbrænding af træ i brændeovne. En mere optimal forbrænding betyder dog et lavere forbrug af brænde, og ved en bedre udnyttelse af brændet dermed en mindre udledning af partikler.

Der foreligger flere fremtidige forbedringsmuligheder af brændeovne generelt, idet placering af brændet giver anledning til uensartet forbrænding i fyrrummet og dette kan en sensor i røgrøret ikke gøre meget ved, om end problemet kan dæmpes.

Projektet kan bidrage til udvikling og eksport af mere avancerede brændeovne fra danske producenter, og på den front sikre danske arbejdspladser. Sensordelen ligger op til at der indbygges mere teknologi i danske produkter og viden fra forskningen overføres til produkter.

Konklusion og sammenfatning

Rapporten tager udgangspunkt i en løbende berøringsløs måling af temperatur og gassammensætning ved hjælp af en IR-sensor placeret på røgrøret fra en brændeovn. En sådan måling kan med ca. 1 sekunds tidsopløsning levere reguleringssignaler til bruger af brændeovn eller til et automatisk reguleringssystem af luften.

I projektet er en IR-sensor til måling af CO i røggas fra brændeovn både udviklet og anvendt. Test på Teknologisk Institut viste, at der var god overensstemmelse mellem en direkte optisk måling af CO i røgrør og deres ekstraktive gasmåling.

IR-sensoren kan anvendes i eksisterende brændeovne og anvendes med en automatisk regulering af luft, således at brugeren kan fyre korrekt og opnå høj energieffektivitet og lave udledninger af luftforurenende stoffer.

Projektet er gennemført med et begrænset budget og en del interessante detaljer omkring IR-sensor er undladt, da rapportens forfattere undervejs har fået nyhedsundersøgt patent ide, og patent er endnu ikke indleveret. Der er foretaget supplerende forsøg på DTU KT mht. at lave en mere simpel og robust udførsel af IR-sensor der måler gastemperaturen, CO₂ og CO, men kan desuden udvides til også at måle H₂O og C_xH_y/CH₄. Der foreligger en del udvikling og test før sådan en sensor kan markedsføres. DTU har den fornødne ekspertise og udstyr til at udvikle IR-sensoren. Pålidelighed, langtidstabilitet og lav pris er afgørende for udbredelse af teknikken.

Summary and Conclusion

An IR sensor can deliver regulation signals to optimize the combustion in wood-burning stoves with a time resolution of less than 1 second. An IR-sensor can be installed on existing wood-burning stoves and the user can from the signals manually regulate the air flows and obtain more efficient and cleaner combustion. A better solution would be to use signals from the IR-sensor for automated control of airflows during the combustion cycle.

An IR-sensor for measurement of CO was developed and tested in the project. A comparison between an optical measurement of CO and extractive gas measurement in a test on a wood-burning stove gave fairly similar results.

Additional experiments was carried out at DTU KT recently using a more robust and simple concept than described in the report. Tests showed that it is possible to develop an IR sensor that measure gas temperature, CO₂ and CO. Furthermore, gas measurements can be extended to include H₂O and C_xH_y/CH₄.

1. Introduktion

1.1 Baggrund

I større fyringsanlæg styres og overvåges forbrændingsprocessen løbende for optimal udnyttelse af brændslet med mindst mulig udledning af forurenende gasser. Dette er i dag stort set ikke økonomisk muligt på mindre anlæg pga. udstyr til pålidelig måling af røggassammensætningen er meget dyrt. Der er dog installeret lamdasonder til iltstyring af forbrændingsluften på et begrænset udsnit af brændefyr og Hwam har i 2012 lanceret en automatisk reguleret brændeovn, hvor luftflow styres ud fra algoritme og ilt målt med en lamdasonde udviklet oprindeligt til biler og røggassens temperatur måles med et termoelement. Det er en trend at sensorer bliver en mere og mere udbredt del af vor dagligdag og medvirker til energibesparelser og bedre bruger adfærd, f.eks. visning af brændstofforbruget i bilen.

DTU/Risø har igennem 25 år arbejdet med avancerede optiske målemetoder til berøringsløs og nøjagtig måling af temperatur og røggassammensætning i større energianlæg, forsøgsanlæg, kraftværker og motorer med bl.a. Fourier transform infrarød spektroskopi (FTIR) finansieret af danske og EU energiforskningsprogrammer. Størstedelen af projekter har omhandlet biomasseforbrænding (halm, træ, affald, mv.) som giver store udfordringer mht. brændslets varierende egenskaber, styring og regulering, belægninger, etc. DTU har igennem disse projekter opnået stor indsigt i de praktiske problemer der er med at anvende optiske målemetoder i et meget varmt og støvfyldt miljø, og opbygget laboratoriefaciliteter og ekspertise op mht. udvikling af nye optiske målemetoder og IR-sensorer til temperatur og gasmåling.

Mange har set eller brugt et infrarødt (IR) termometer (f.eks. øretermometer), som kan bruges til hurtig og pålidelig måling af temperatur ud fra den infrarøde udstråling, f.eks. kan et øretermometer til få hundrede kr. måle temperatur med en nøjagtighed på 0,1-0,2° C med god langtidsstabilitet. Centrale dele som indgår i et IR termometer såsom sensor og elektronik er prisbillige komponenter (1-5 USD pr. stk.), og vil kunne indgå i en ny type IR-sensor til måling af gaskoncentration i stedet for temperatur. Mange vigtige gasser som dannes ved forbrænding, såsom CO, CO₂, H₂O og uforbrændte kulbrinter, absorberer og udsender infrarødt lys. Det er derfor i princippet muligt, at lave en langtidsstabil IR-sensor som f.eks. samtidigt måler CO₂ og CO koncentration plus evt. gastemperatur, hvor CO₂ kan erstatte en indirekte iltmåling og CO er en velkendt kvalitetsindikator for forbrændingsprocessen, samt partikelemissionen øges betydeligt ved høj CO.

1.2 Formål

Forprojekt går ud på at danne grundlag for at fremstille og demonstrere en ny type prisbillig og langtidsstabil IR-fyringssensor til måling af CO og CO₂ fra brændefyr, pillefyr og brændeovne med henblik på at opnå en mere effektiv forbrænding med mindre partikelemission. Målet er, at en IR-fyringssensor på sigt kan introduceres på markedet og medvirke til en bedre forbrænding gennem dels bedre styring og regulering, dels bedre brugeradfærd.

1.3 Forventede miljømæssige effekter og vurdering af markedspotentiale

Der er vanskeligt for den enkelte bruger af biomassefyr og brændeovne at vurdere, hvor godt de udnytter brændslet og hvor vidt man forurener mere eller mindre. Mange viser faktisk stort interesse for, at de får mest muligt ud af deres fyring, men selv med tør og godt brændsel skal der en fagmand til med dyrt måleudstyr for at afgøre om fyringsforholdene reelt er optimale. Næste uge er

vejret slået om og fyringsbehovet er ændret, hvorfor der må fyres anderledes og forbrændingsluften skal tilpasses tilsvarende.

Alene en simpel CO indikator i form af en lysdiodesøjle som troværdigt indikerer fra ingen/lav CO (god forbrænding) til høj/meget høj CO (dårlig brændselsudnyttelse, partikelemission) ville være et aktivt skridt i den rigtige retning. Ved en hurtig reagerende CO indikation vil brugeren på stedet kunne finjustere forbrændingsluften og evt. luftfordeling så bedst mulig forbrænding opnås med lav CO og sod emission. Markedspotentialet er stort såfremt prisen kan bringes ned til et niveau, hvor brugeren samtidig opnår en rimelig tilbagebetalingstid gennem en bedre udnyttelse af brændet. En simpel men tydelig indikator vil kunne medvirke til at tænde brugerens interesse for en mere energieffektiv og miljørigtig fyring.

1.4 Tilskyndelseseffekt

Der ligger en stor udfordring i at skabe og billiggøre en IR-fyringssensor til det private marked. Der findes kun i begrænset omfang billige sensorer, f.eks. en kemisk celle til CO-måling, men levetiden vil være utilfredsstillende i en ovn fyret med biomasse.

Det er nødvendigt at tænke i nye baner end hidtil for at kunne fremstille en IR-fyringssensor til on-line gasmåling i bio- og brændefyr samt brændeovne, dels prismæssigt mht. valg af koncept, materialer og teknologi, og dels funktionsmæssigt mht. robusthed, brugervenlighed og pålidelighed. Der kræves en særlig fokuseret indsats at gennemføre projektet, herunder midler til undersøgelser, udvikling, test og forsøg. Dette projekt skal bidrage til at danne grundlag for introduktion af en IR-fyringssensor på markedet, herunder skabe erfaringsgrundlag fra undersøgelser og målinger. Der er pt. mange usikkerhedselementer mht. valg af løsninger og hvilke praktiske problemer dette afleder. Projektet sigter på at vise, at der kan findes en farbar vej, hvilke problemer der skal løses, estimere et prisniveau for IR-fyringssensor, patentmuligheder, etc.

1.5 Rapportens opbygning

I afsnit 2 belyser vi forskellige metoder til måling af CO og andre gasser på baggrund af et litteraturstudie. Vi beskriver 4 teknikker. Vi har i denne rapport begrænset os til at beskrive optiske metoder, trods der findes ikke-optiske metoder, såsom måling af modstand i halvleder materialer eller måling af strøm i en elektrokemisk celle. Vi har taget udgangspunkt i optiske teknikker, fordi dels der kan måles uden direkte kontakt med røggassen, dels er de som regel langt mere præcise og responsive end de ikke-optiske metoder.

2. Litteraturstudie af spektroskopi til måling af CO

2.1 Kort om spektroskopi og CO

Spektroskopi bygger på viden om absorptionslinjer af individuelle vibrations-/rotations-linjer for grundstoffer. En absorptionslinje og dennes linjestyrke er en fundamental egenskab og karakteristisk for grundstoffer. På baggrund af absorptionslinjer og deres linjestyrker, kan man beregne en eksakt grundstofkoncentration. Da linjestyrken er stærkt temperaturafhængig er viden om temperaturen en vigtig parameter i beregningen.

Den mest velkendte form for spektroskopi er *absorptionsspektroskopi*. Her er princippet, at en detektor måler intensiteten af en lyskilde, der udsender lys omkring den bølgelængde, som et grundstof absorberer. Når en gas passerer lyskilden bliver noget eller alt kildens lys (afhængig af kildens båndbredde) ikke transmitteret gennem gassen. Derved kan et fald i lyssignalet registreres på detektoren og omregnes til en grundstofkoncentration.

En anden form for spektroskopi er *excitationsspektroskopi*. Her er princippet at en detektor måler intensiteten af en gas, der bliver exciteret, dvs. at gasen udsender lys med den bølgelængde, som grundstoffet først absorberer og siden udsender. Derved kan en stigning i lyssignalet registreres på detektoren og omregnes til en grundstofkoncentration. I de følgende afsnit beskriver vi både absorptions- og excitationsspektroskopi.

Absorptionslinjerne og deres linjestyrke for grundstoffet CO ved 2.000 K er vist i Fig. 1. CO har stærke bånd omkring 4.600 nm, og andre bånd, overtonebånd, som er langt svagere omkring 2.300 nm, 1150 nm og 575 nm.

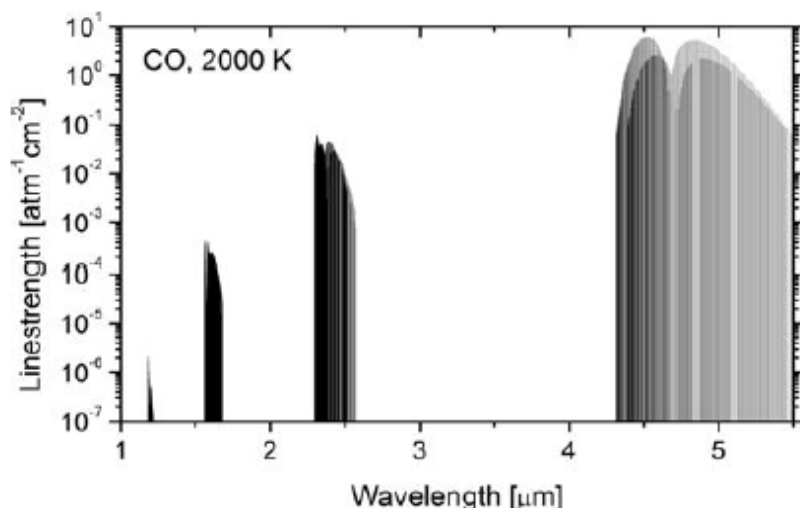


Fig. 1. Linjestyrke versus bølgelængde af CO i det infrarøde område ved 2.000 K. Figur kopieret fra [1].

2.2 Absorbtionsspektroskopi

2.2.1 Med Fourier Transform og simpel IR kilde

Et af de mest velkendte absorptionspektrometre er et Fourier-Transform-Infra-Red (FTIR) spektrometer og kan også karakteriseres som et interferensspektrometer. Det er skematisk bygget op som vist i Fig. 2.

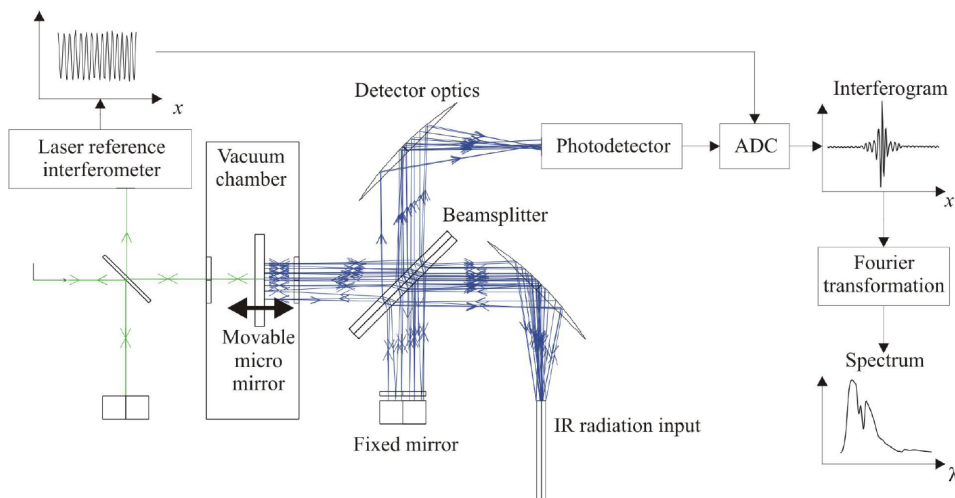


Fig. 2. Skematisk opstilling af FTIR. Figur kopieret fra [2]

Et FTIR spektrometer består af et simpelt Michelson interferometer, hvor man opnår et interferensmønster på detektoren, som afhænger af positionen på et translaterende spejl. Ved at lave en Fourier transformation kan man komme fra tidsdomænet over til frekvensdomænet og dermed opnå absorptionsspektret som funktion af bølglængden. Spektralopløsningen afhænger af den samlede optiske vejlængde i spektrometret og jo længere den er, dvs. jo større spektrometret er, desto finere kan spektret opløses. En ulempe ved FTIR spektrometre er, at de grundet deres fine opløsning, som regel er relativt store apparater og derudover kræver translation eller rotation af et spejl eller gitter. Derudover har de dyre kølede foto-dioder for god signaldetektion. Endvidere kræver FTIR en laser til referencemåling af det translaterende spejl og dyre beamsplittere samt spejle.

Der har været meget forskning i at simplificere og minimere FTIR spektrometre [2-7]. En måde at komme uden om en løsning med en bevægelig komponent er at sætte arrays op af dyre kølede detektorer. På den måde udnytter man information om detektorernes rumlige placering i stedet for den tidlige placering af spejlet, og man opnår dermed et såkaldt spatial heterodyne spectrometer [3].

Nyudviklet Mikro-Optisk-Elektrisk-Mekanisk-System (MOEMS) og Mikro-Elektrisk-Mekanisk-System teknologi har haft stor indflydelse på minimering af FTIR [2,4-5].

For nyligt er et ultra kompakt ($55 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$) FTIR spektrometer til detektering af CO_2 og CH_4 blevet fremstillet med en detektor og et enkelt roterende MEMS gitter [5]. Dette er i stand til at detektere signaler fra 1.000-5.000 nm, men er ikke kommercielt tilgængeligt endnu. Det er stadig relativt dyrt grundet blandt andet selve MEMS gitret og den kølede detektor.

En måde at billiggøre detektordelen i FTIR spektrometre er ved at bruge såkaldte foto-akustiske detektorer [6]. En stor fordel ved at anvende foto-akustiske detektorer i FTIR spektrometre er, at man ikke behøver en laser referencemåling af det translaterende spejl. Der er sket en stor udvikling af disse i de sidste par år og stor præcision er påvist i traditionelle FTIR spektrometre [7].

Det er veldokumenteret, at FTIR kan bruges til at detektere CO koncentrationer i velkendte gasblandinger med temperaturer op til 1.250 K [8]. Man kan med andre ord måle CO koncentrationer i f.eks. røggas meget præcist med FTIR.

For: FTIR spektrometre er præcise og hurtige. De har mulighed for scanning af mange bølgelængder og dermed mange grundstoffer på kort tid. Det har god opløsning og minimalt optisk tab.

Imod: Fælles for alle FTIR er, at de er relativt dyre. Nogle kræver flytbare elementer, såsom translation eller rotation af spejle eller gitre under scanning og andre anvender også en eller flere dyre, kølede detektorer. De fleste FTIR spektrometre er relativt store. FTIR er optisk og kræver dermed optisk adgang gennem et vindue, som kan blive snavset. En laser skal som regel bruges til referencemåling. Endelig er FTIR følsom over for rystelser.

2.2.2 Med filter og simpel IR kilde

I stedet for interferensspektroskopi, kan man benytte sig af gitter- eller filter spektroskopi. Her placerer man foran detektoren et gitter eller filter der kun tillader en given bølgelængde at passere. På den måde undgår man flytbare elementer.

Et eksempel på filterspektroskopi af CO₂ (og i princippet CO og andre gasser) med en simpel black body kilde og bolometer (som minder om et simpelt thermocouple) er påvist i [9] og vist i Fig. 3.

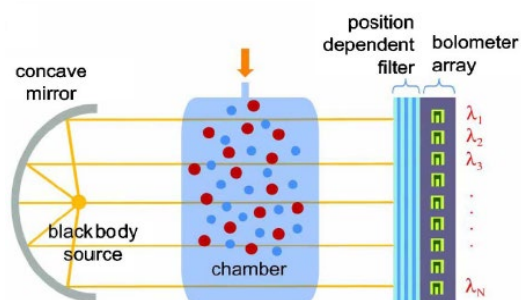


Fig. 3. Simple opstilling til måling af grundstoffer i et gaskammer. Figur kopieret fra [9]

Filtrene i den ovenstående opstilling er såkaldte photonic bandgap filtre [9], men mange forskellige typer kan anvendes. For at måle en enkel gas behøves kun en type IR kilde, et IR hulspejl eller anden form for fokuseringsoptik, et slags filter og en type IR detektor.

For: Spektroskopi med simpel IR kilde og detektor er præcist og hurtigt. Det kan bruges til identifikation af enkle grundstoffer og hver detektor måler et grundstof. Køling af detektorer er valgfri men giver altid bedst følsomhed. Både IR kilde og ikke-kølet detektor er billige.

Imod: Spektroskopi med simpel IR kilde og detektor kræver optisk adgang via et vindue, der kan blive snavset. Da hver grundstof måles af en detektor, er opstillingen kun optimal til måling af få grundstoffer. Grundet filter er der optisk tab, som er afhængig af filtertypen.

2.2.3 Med IR laser kilde

I stedet for at anvende filtre til at udvælge den bølgelængde, som man er interesseret i, som i forrige opstilling, kan man bruge en laser (laserspektroskopi), hvorved man belyser gassen med præcis den ene bølgelængde man er interesseret i.

CO er på den måde blevet målt i en udstødningsflamme ved at bruge en InGaAsSb/AlGaAsSb diode laser ved 2.319 nm og en kølet InAs detektor [10].

En Quantum Cascade Laser (QCL) kan tunes til at udsende en enkelt linje IR lys ved omkring 4600 nm og dermed bruges i en opstilling til at detektere det kraftige CO bånd.

CO måling med QCL er blevet dokumenteret i [1], hvor IR signalet er målt med en kølet InSb detektor. Ved at anvende en beamsplitter, en etalon og en detektor, er man i stand til at lave en referencemåling af laserens. Opstillingen er vist i Fig. 4. Endvidere er det demonstreret, at man kan tune laseren i et lille område omkring de 4.600 nm og på den måde måle forholdet mellem 2 karakteristiske CO bånd. Da dette forhold er temperaturafhængigt, kan man nøjagtigt måle temperatur samtidigt med, at man får information om grundstofkoncentrationen.

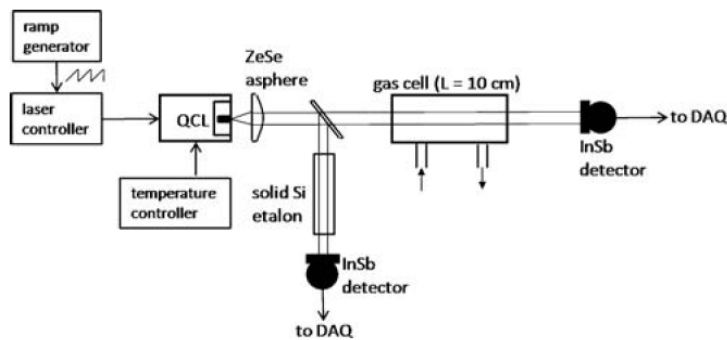


Fig. 4. Laserspektrometer til måling af grundstoffer i et gaskammer. Figur kopieret fra [1]

For: Laser spektroskopi er præcist og hurtigt. Det kan bruges til identifikation af enkelte grundstoffer og flere hvis laseren kan tunes. Tuning kan udnyttes til at måle temperaturafhængigheden af absorptionslinjer og dermed temperatur. Der bruges kun en detektor, men en ekstra kan bruges til at få en referencemåling. Køling af detektorer er valgfri men giver altid bedst opløsning. Endelig behøves ikke filtre eller gitre, og dermed er der ikke optisk tab.

Imod: En diode laser er langt billigere end en QCL, men begge lasere er relativt dyre og kræver optisk adgang via et vindue, der kan blive snavset.

2.3 Excitationsspektroskopi

2.3.1 Med UV buelampe

CO kan exciteres til en tilstand, hvor det udsender UV lys ved omkring 380-390 nm [11]. Dette kræver en UV kilde med stor energi, og det er blevet foreslået i [11], at man i en gas exciterer CO med en UV buelampe, der afgiver en gnist ved store spændinger. En mulig opstilling er vist i Fig. 5.

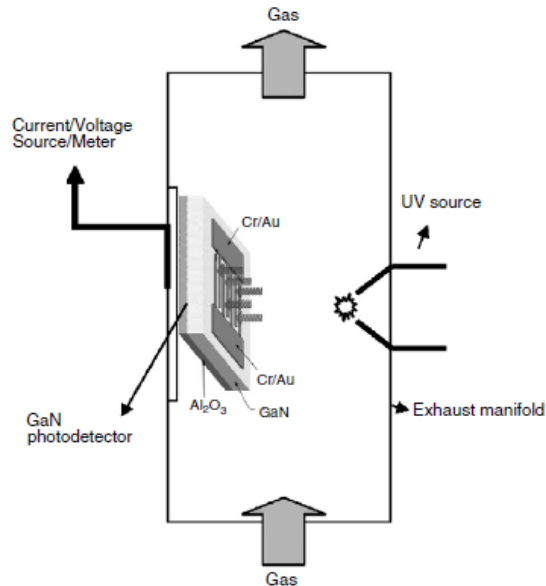


Fig. 5. Opstilling til måling af CO i røggas med UV kilde og detektor. Figur kopieret fra [11].

Detektoren i opstillingen er en Galium Nitrid (GaN) foto-detektor, som kan klare høje temperaturer (over 550° C [11]) og har mikro varmelegemer, der sørger for at oxidere skidt på overfladen og derved altid holde den ren ved temperaturer lavere end 550° C (den er selvrensende ved højere temperaturer). Detektoren kan altså være direkte inde i gaskammeret og i en afstand af 30 mm fra buelampen.

Udover måling af CO er opstillingen også anvendt til måling af NO gas.

For: UV spektroskopi er præcist og hurtigt. Det kan bruges til identifikation af enkle grundstoffer. Der bruges kun en ikke-kølet detektor. Den kan integreres i et gaskammer uden brug af optiske vinduer. Endelig behøves ikke filtre eller gitre.

Imod: En GaN detektor er relativ dyr. Buelampens levetid i en ovn kan forringes. Excitering af andre gasser med lignende absorptionlinjer kan være mulig og dermed påvirke signalet. Et filter skal derfor bruges til at skærme for disse bølgelængder. Ved anvendelse af filter er der optisk tab.

3. Idé og princip

Det første kriterium for en CO måler er, at den er prisbillig. Af denne grund alene, vælger vi en opstilling, der svarer til den i Fig. 3, og dermed spektroskopi med filter og simpel IR kilde.

Generelt har en dyr detektor en stor følsomhed. De mest almindelige IR detektor og deres følsomhed er vist i Fig. 6. En thermopile er en forholdsvis billig detektor med en god følsomhed og langtidsstabilitet, men som ikke kan konkurrere med de dyre, kølede detektorer. Trods dette, kan man sagtens benytte dem i en simpel optisk måling af CO og andre gasser, som også beskrevet i forrige afsnit.

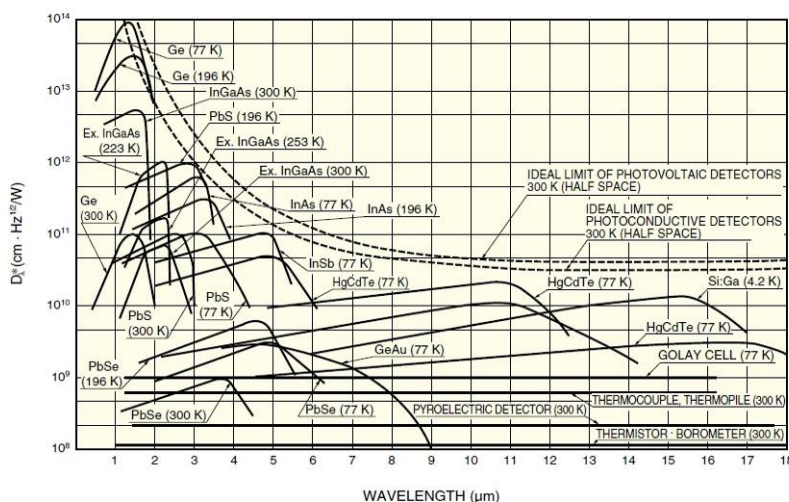


Fig. 6. Følsomhed versus bølglængde for forskellige detektor. Figur kopieret fra http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics_and_use_of_infrared_detectors.pdf

Da signalet for CO er stærkest omkring 4600 nm (se Fig. 1), er det ideelt at måle her.

I dette projekt har vi gennemført forsøg med en røggas i et rørør/skorsten fra en brændeovn ved hjælp af en simpel IR kilde. Vi har endvidere detekteret signalet med en thermopile, da dette er en simpel og billig løsning uden bevægelige dele. Vi filtrerede lyset omkring 4600 nm med et interferensfilter.

Princippet bevist

3.1 Målinger på Teknologisk Institut

For at demonstrere at CO kan måles i et røgrør, har vi opstillet et FTIR spektrometer som vist i Fig. 7.



Fig.7. Teststand på TI Århus med opstilling til måling af CO i røgrør med FTIR.

Vi belyser gassen med en black body kilde. Forsøget er udført på Teknologisk Institut, da de samtidigt kan måle CO ved røgudtræk. Denne teknik bruges som standard måleteknik til test af brændovne for at kontrollere CO og andre gasudviklinger.

I et tidsforløb på 13.000 sekunder (3,61 timer) målte vi et CO indhold ved hjælp af røgudtræk, og absorption af CO ved hjælp af FTIR. Tidsforløbet er beskrevet i Tabel 1, mens de to målinger fra de to metoder er vist i Fig. 8.

Tabel 1. Oversigt med detaljer for brænding.

Tidsperiode	Brændtid	Proces	Primær luft	Sekundær luft
0 – 1.670 s	1.670 s	Optænding	NA	NA
1.670 – 4.560 s	2.890 s	Forfyring	20 %	100 %
4.560 – 7.210 s	2.650 s	Fyring #1	20 %	100 %
7.210 – 9.415 s	2.205 s	Fyring #2	200 %	100 %
9.415 – 11.750 s	2.335 s	Fyring #3	20 %	100 %
11.750 – 13.000 s	1.250 s	Fyring #4	200 %	100 %

Ved sammenligning af de to målinger i Fig. 8, kan det ses, at der er god overensstemmelse mellem de to målemetoder.

I den første proces, optænding, bliver ovnen tændt op, og der kan straks ses en stigning i CO. I hele optændingsperioden er brændingsprocessen ikke optimal, og der bliver justeret på ovnens indstillinger af primær og sekundær luft for en god indstilling, hvorfor der kan ses en variation af CO. I tiden op til optændingsforløbet afslutning (1.670 s) ses en stigning af CO.

I forfyrringsprocessen, bliver ovnen fyret med et læs brænde, som har til funktion at varme ovnen op til optimale betingelser for tests. Det er først efter denne proces, at en brændeovn per definition bliver testet. I forfyrringsprocessen minder forbrændingen om et normalt og forventet forløb, som kan deles op i tre faser: udtørring, gasforbrænding og kulforbrænding. Under udtørring og kulforbrænding er der dannelse af CO. Dette karakteristiske forløb er tydeligt i forfyrringsprocessen. I gasforbrændingen er der et lavt indhold af CO, og forbrændingen er med andre ord optimal.

Et næsten identisk forløb, men hvor brændeovnen dog er blevet varm, og CO udvikling her er lidt mindre end i forfyrringen, kan ses under fyring #1. I fyring#1, samt forfyrringsprocessen er der 20 % og 100 % åbent for henholdsvis primær og sekundær luft, hvilke er optimale indstillinger.

I fyring #2, åbner vi primær lufttilførslen langt over det normale maximum (200 %) og som et resultat deraf får vi en kæmpe udvikling af CO. Herefter er forløbet normalt. Udfra CO indholdet eller CO absorptionen, kan vi se at luftindstillingen ikke er optimal.

Under fyring #3, slukker vi for IR kilden, og laver en normal brænding med optimale betingelser. Vi udnytter her, at røgrøret udstråler varme, som vi kan bruge som kilde. Under disse betingelser, viser det sig, at vi er i stand til at også at identificere CO med spektroskopi og beskrive det karakteristiske brændeforløb.

I den sidste fyring #4, udfører vi med vilje en utrolig dårlig brænding (fuldt åben primær og sekundær luft) af materiale med stor overflade (pinde), så der kan komme god lufttilførsel. Her kommer som resultat en markant højt udvikling af CO, som igen illustrerer at vi på baggrund af CO kan se om indstillingen er optimal eller ej. På baggrund af disse resultater, har vi påvist, at vi kan bruge spektroskopi i røgrøret til at måle CO og samtidig få en indikation af brændeovnsindstillingerne som ønskes reguleret.

Trods CO er en god indikator for fyringskvaliteten, og dermed iltindstillingen, er det for en automatisk regulering af ilt vigtigt, at vi ved, om forløbet er i starten eller slutningen af fyringen. Baseret på CO alene, ved vi ikke dette, da CO er højt både i starten og slutningen. Som indikator for hvor i processen vi er, kan vi som en ekstra måling have CO₂, da dette vil være lavt og faldende i slutningen af forbrændingen. Måling af CO₂ med Teknologisk Institut standardudstyr er vist i Fig. 9. CO₂ kan ikke bruges alene til et mål for forbrændingskvalitet, men kun til mål for forbrændingsforløbet.

Som alternativ til måling af CO₂, kan vi måle temperaturen, da denne også vil være faldende sidst i forbrænding og stigende i starten. Temperatur kan nemt måles med en thermopile, og med viden om temperaturen, kan vi ydermere lave en eksakt beregning af CO koncentrationen, når vi har et mål for absorptionen.

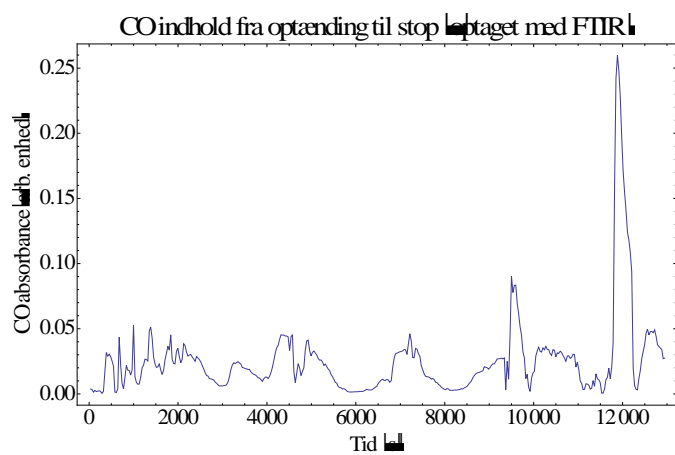
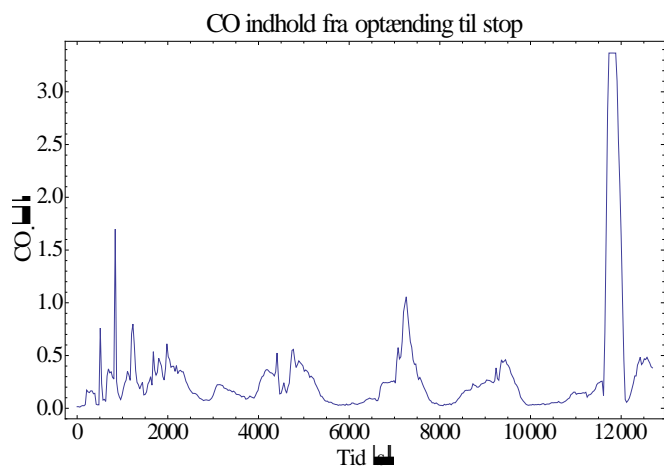


Fig.8. CO versus tid for to forskellige målemetoder.

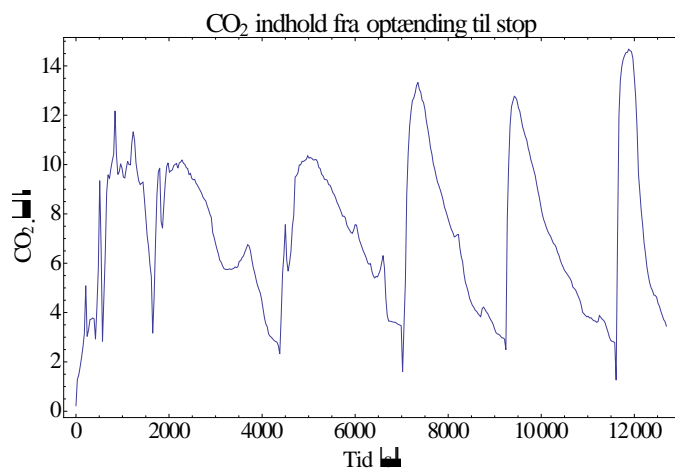


Fig.9. CO₂ versus tid målt med Teknologisk Institut standard udstyr.

3.2 Tilsmudsning af vinduer

Et kritisk punkt i en optisk måling er, om et vindue kan holdes rent over længere tid, dvs. undgå afsætning af smuds på vindue i form af partikler og kondensat. For at undersøge tilsmudsning og rensning, bliver to brændeovne hver monteret med to vinduer; et vindue bliver beskyttet mod snavs ved luftflow fra (1: aktiv rensning) en lille blæser, mens et andet bliver beskyttet ved (2: passiv rensning) et mindre luftflow via det naturlige undertryk i røgrør fra skorstenen.

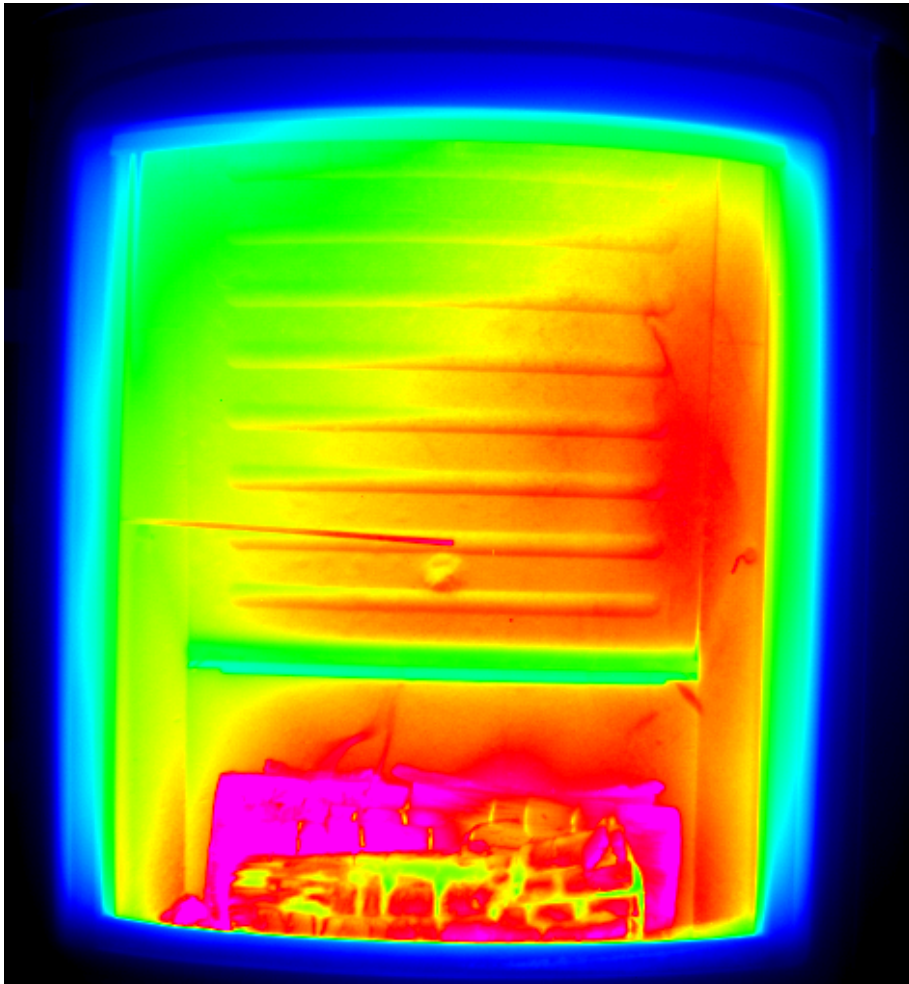


Fig. 10. Termisk billede målt med et specielt IR-kamera igennem glaslågen på brændeovn under test på DTU KT. Cyanfarve svarer til overfladetemperatur på 713° C inde i ovn.

Den aktive og passive rensning bliver installeret foran et vindue på to brændeovne i en testperiode på 2 måneder. Brændeovn nr. 1 bliver fyret 2-3 gange i døgnet, mens der i ovn nr. 2 bliver fyret 2-4 gange i døgnet. De to former for rensning er vist i Fig. 11 med ovn 1 som eksempel.

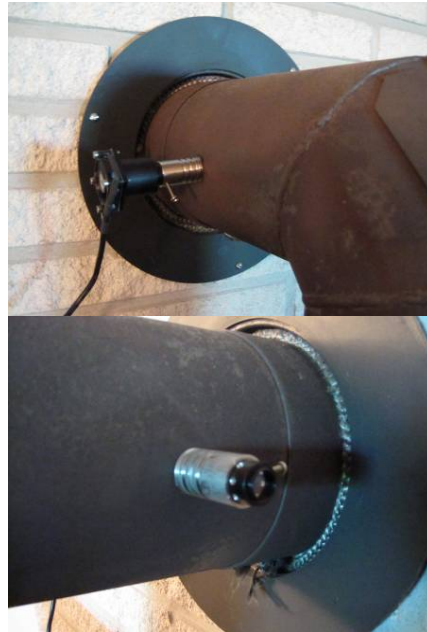


Fig. 11. Test setup tilsmudsning af vinduer på ovn 1.

Efter testperioden bliver de 4 vinduer og deres respektive transmission målt med FTIR spektrometri. Resultatet heraf kan ses i Fig. 12.

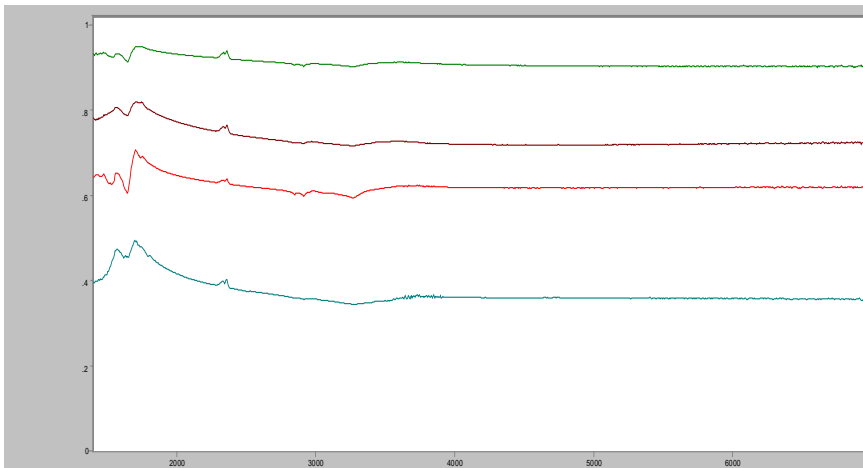


Fig. 12. Transmission af måling af vinduer (ø6 mm) efter testperiode. Transmissionsspektre i spektralområdet 1.500 – 7.000 cm^{-1} (1,43 – 6,67 μm), ovn2 med blæser (grøn kurve), ovn1 med blæser (brun kurve), ovn2 uden blæser (rød kurve) og ovn1 uden blæser (cyan kurve).

Ud fra Fig. 12, fremgår det, at den aktive løsning er bedre end den passive løsning. Resultaterne er skematisk vist i Tabel 2, og fremstår også kvalitativt jf. Fig. 13. Udover de faktiske transmissionstal i Tabel 2, har vi også beregnet driftstiden for de to ovne med de to forskellige former for rensning.

Tabel 2. Transmission efter testperiode.

Forsøgsovn	Princip spuleluft	Transmission efter testperiode ved 4,65 μm	Beregnet driftstid til rensning ved $\tau=30\%$ *
Ovn1	Med blæser	93 %	6,1 år
	Uden blæser	64 %	1,0 år
Ovn2	Med blæser	76 %	1,4 år
	Uden blæser	40 %	0,4 år

*: 180 fyringsdage med 2-4 fyringer per dag er antaget



Fig. 13. Tilsmudsning af safirvinduer $\varnothing 12,7$ mm efter testperiode ovn1 tv og ovn2 th. De aktivt rensede vinduer ses til højre i hvert billede.

Grunden til at der er væsentlig forskel i transmission gennem vinduerne og driftstid for de to ovne, er, at ovn2 både er anderledes i konstruktion og i væsentlig dårligere stand end ovn1.

Vi har hermed påvist, at vi kan have optisk adgang via et vindue i et røgrør fra en brændeovn, og at vi kan holde det rent enten med en aktiv eller passiv rensning. Det skal understreges, at design til renlighed af vinduer kan forbedres i forhold til de rapporterede, men dette hemmeligholdes af hensyn til beskyttelse og patentering.

4. Prototype

En prototype på vores CO sensor er vist i Fig. 14. Opstillingen består af en IR kilde (med kollimerende linse) og en detektor (med fokuserende linse).

IR kilden er en simpel glødelampe, mens den kollimerende og fokuserende linse begge er Thorlabs standard IR linser med fokusb længde på 20 mm. Detektoren er en thermopile fra Heiman. Foran detektoren har vi placeret et interferens filter, som kun transmitterer lys ved $4,65 \mu\text{m}$. Data fra det optiske signal fra detektoren bliver behandlet i boksen med elektronik og bliver overført til en PC via USB kabel.

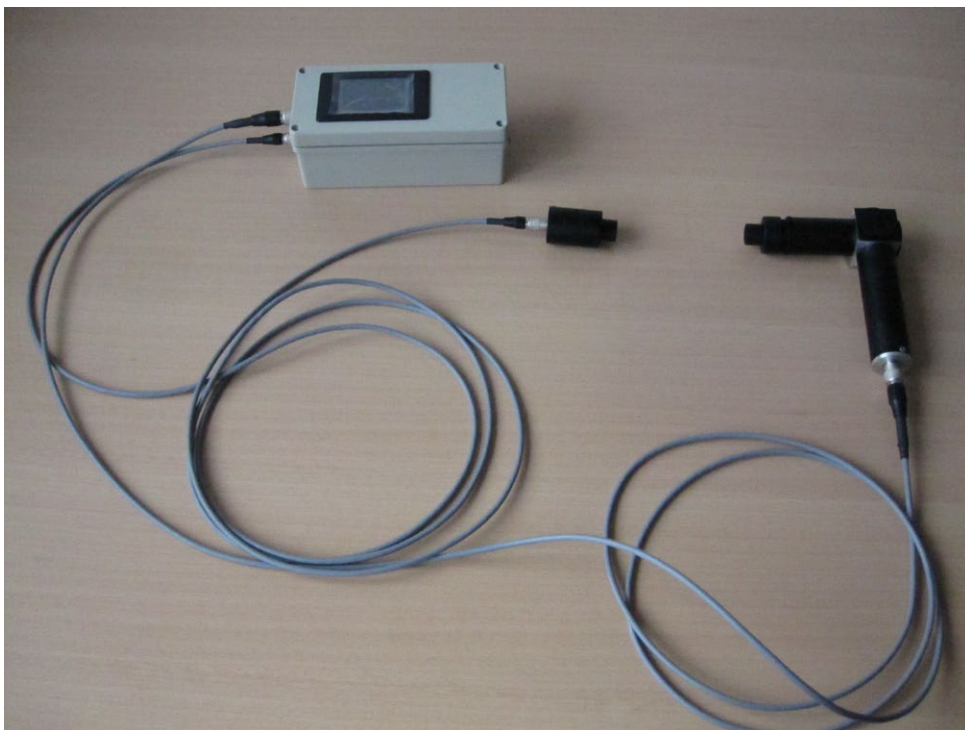


Fig. 14. Prototype på CO sensor.

For at teste en måling af CO, fylder vi en 1 % CO gas blanding i en gascelle mellem sensor og IR kilden, og måler det optiske signal. En måleserie er vist i Fig. 15.

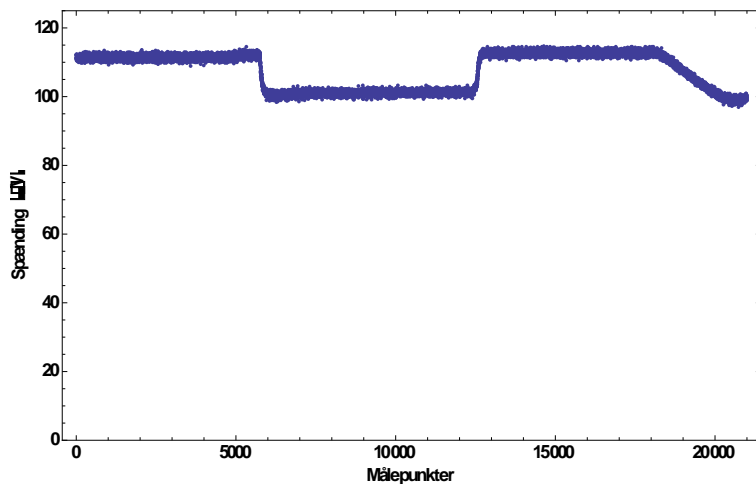


Fig. 15. Måleserie med CO sensor.

I måleserien laver vi først en periode på 5.500 målepunkter, hvor gascellen er tom. Vi fylder derefter gascellen med CO blandingen, hvor vi har 7.000 målepunkter. Fyldningen foregår med højt tryk, og kan betragtes som en instantan fyldning. Efter dette tømmer vi CO indholdet ved at blæse ren CO_2 ind i cellen ved højt tryk. Herefter fylder vi igen cellen med CO blandingen men ved lavere tryk, således at ændringen bliver stille.

Som det kan ses fra Fig. 14, ser vi et nedslag i det optiske signal, når vi fylder gascellen med CO. Den optiske vejlængde er 10 cm mellem IR kilden og detektoren, og på denne strækning får vi et 10% nedslag i signal med en 1% CO blanding. Fyldningen af ren CO_2 bevirker, at vi får fjernet alt CO, og vi ser da at signalet bliver det samme som ved atmosfærisk luft, og dermed at CO_2 ikke påvirker vores måling. Med andre ord har vi her påvist en CO måling, som ikke bliver påvirket af en anden gas med absorption tæt på CO. Grunden til at vi ikke har påvirkning fra andre gasser i vores CO måling er pga. interferensfiltret ved detektoren. Både CO_2 og H_2O i røggassen absorberer dog i princippet i det bånd hvor CO ligger, men denne effekt er lille i dette tilfælde. Detektionsgrænsen for CO måling i rørør med en diameter på 15 cm er omkring 500 ppm Vol. for denne CO sensor, dvs. svarende til det CO niveau, der er i røggassen i en typisk bedre brændeovn, hvor der er god forbrænding.

Referencer

- [1] J. Vanderover and M. A. Oehlenschlaeger, "A mid-infrared scanned-wavelength laser absorption sensor for carbon monoxide and temperature measurements from 900-4000K", *Applied Physics B* 99, pp. 353-362 (2010)
- [2] Thilo Sandner, Andreas Kenda, Christian Drabe, Harald Schenk, Werner Scherf, "Miniaturized FTIR-Spectrometer based on Optical MEMS Translatory Actuator," *Proc. of SPIE Vol. 6466*, pp. 646602-1-12 (2007)
- [3] James E. Lawler, Zac E. Labby, John M. Harlander and Frederick L. Roesler, "Broadband, high-resolution spatial heterodyne spectrometer," *Applied Optics*, 47(34), pp. 6371–6384 (2008)
- [4] Thomas Otto, Ray Saupe, Alexander Weiss, Volker Stock, Reinhard Bruch and Thomas Gessner, "Principle and Applications of a new MOEMS-Spectrometer," *Proc. of SPIE Vol. 6114*, pp. 611409-1-10 (2006)
- [5] T. Scharf, D. Briand, S. Bühler, O. Manzardo, H.P. Herzig, N.F. de Rooij, "Miniaturized Fourier transform spectrometer for gas detection in the MIR region," *Sensors and Actuators B: Chemical*, 147, pp. 116–121 (2010)
- [6] Christopher Manning, Mike Gross, Joshah Jennings, John Wuthrich, Alan Samuels, "Miniature FT-IR spectrometer for passive and active sensing," *Proc. of SPIE Vol. 6378*, pp. 63780T1-9 (2006)
- [7] Christian Bernd Hirschmann, Juho Uotila, Satu Ojala, Jussi Tenhunen and Rittta Liisa Keiski, "Fourier Transform Infrared Photoacoustic Multicomponent Gas Spectroscopy with Optical Cantilever Detection," *Applied Spectroscopy*, 64, pp. 293–297 (2010)
- [8] Patrick J. Medvecz and Kenneth M. Nichols, "Experimental Determination of Line Strengths for Selected Carbon Monoxide and Carbon Dioxide Absorption Lines at Temperatures between 295 and 1250 K," *Applied Spectroscopy*, 48(11), pp. 1442-1450 (1994)
- [9] H. Esat Kondakci, Mecit Yaman, Aykutlu Dana, and Mehmet Bayindir, "Photonic bandgap infrared spectrometer," *Applied Optics*, 49(18), pp. 3596-3600 (2010)
- [10] Jian Wang, Mikhail Maiorov, Douglas S. Baer, Dmitri Z. Garbuzov, John C. Connolly, and Ronald K. Hanson, "*In situ* combustion measurements of CO with diode-laser absorption near 2.3 mm," *Applied Optics*, 39(30), pp. 5579-5589 (2000)
- [11] M. Mello, B. Poti, A de Risi, A. Passaseo, M.Lomascolo and M De Vittorio, "GaN optical system for CO and NO gas detection in the exhaust manifold of combustion engines," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 8, pp. S545–S549 (2006)

Resumé

Der er flere fremtidige forbedringsmuligheder af forbrændingen i brændeovne. DTU har udviklet og testet koncept til en billig og simpel IR-sensor til måling af CO i røggas fra brændeovne.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
DK - 1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

www.mst.dk