

Rostövervakning – Nya metoder för reglering och övervakning av förbränningsrost

Åsa Rodin, Jürgen Jacoby, Elisabet Blom

Rostövervakning – Nya metoder för reglering och övervakning av förbränningsroster

Grate monitoring systems – New methods for surveillance and control

Åsa Rodin, Jürgen Jacoby, Elisabet Blom

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Augusti 2003
ISSN 0282-3772

Abstract

Målet med projektet har varit att ta fram kunskap och utvärdera nya mätmetoder för rostövervakning. Laser, ultraljud, radar och gammagivare har utvärderats. Projektet var inriktat på att i första hand prova befintliga mätinstrument på marknaden. Det har visat sig vara svårt att finna några nya mätinstrument på dagens marknad som passar för rostövervakning. Däremot föreslås fortsatt utveckling av gammagivare och lasersensorer.

Sammanfattning

Målet med projektet har varit att praktiskt prova och utvärdera nya metoder att övervaka förbränningsrostar, samt att ta fram kunskap om olika sensorers användbarhet med målet att finna driftinstrument som ger driftsäkra och repetitiva signaler.

Syftet med projektet är att en bättre kontroll och styrning av bränslebädden ger en jämnare gasproduktion. En jämn förbränning ger mindre och jämnare emissioner, högre verkningsgrad, ökad genomsnittlig last och lägre driftkostnader. För att en förbättrad reglering skall uppnås krävs kännedom om det momentana tillståndet av bränslebädden.

Tre olika laser samt ett ultraljud har provats i försök i panna. Ingen av instrumenten gav driftsäkra resultat. Den största orsaken har ansetts vara stoft- och partikelhalten, som ger en alltför stor spridning av signalerna i pannan.

Samtliga instrument som använts i försöken har varit kommersiella instrument som ej varit specifikt utvecklade för mätning i pannmiljö. Signalbehandlingen i dessa mätinstrument är okänd och hur signalbehandlingen påverkat resultaten av försöken är oklart.

För både laser och ultraljud är en relativt låg frekvens och hög intensitet lämplig för mätning i pannmiljö. Det är dock svårt att finna instrument med tillräckligt hög intensitet på den kommersiella marknaden.

För att radar skall fungera som mätinstrument måste mätobjektet vara konduktivt för att reflektera radarvågorna, vilket inte en bränslebädd är. Därmed uteslöts radar som tänkbart mätinstrument för rostövervakning.

Gammamätare används redan idag som nivågivare för rostbäddar. Idag monteras gammamätarna i horisontell led. Med en placering i vertikal led skulle möjlighet ges till en bättre reglering vid bränsleinmatningen.

Laser och gammagivare anses ha störst potential som mätinstrument i rostövervakningssammanhang och rekommendationen är att fortsatt utveckling sker av gammamätare och laserinstrument för ändamålet. Detta bör ske i samarbete med instrumenttillverkare för att instrumenten skall bli så anpassade som möjligt till pannmiljön.

Summary

The objective of this project has been to practically test and evaluate new measurement methods for surveillance of grate combustion systems as well as to investigate the feasibility and applicability of different instruments with respect to repetitive and continuous measurement signals.

Finding adequate measurement techniques will enable a better control of the combustion grate which will result in an even combustion. This in turn will reduce the overall emissions and will increase the average load on the entire system. This aim can however only be reached if the momentary conditions on the grate are known.

Three different laser systems and one ultrasonic system have been tested during the course of the project. None of these instruments however was suitable for continuous measurements in such an environment. It is expected that the very high concentration of dust and particulates inside the incinerator caused a too intense dispersion of the measurement signals.

All units that have been tested are commercially available and are not specifically designed for measurements in a waste incinerator. The exact signal processing within each system was not known and its affect on the measurement results could thus not be estimated.

Due to the high concentration of particulates and dust, any measurement system should have an intensity of its measurement signal higher than for low-dust applications. However, commercial instruments have been developed in the opposite direction, i.e. lower intensities in order to improve that safety of the working environment.

Radar-based systems have been considered as a possible measurement technique. However, the fuel needs to be conductive in order to act as a radar-reflector. This is not the case in a waste incinerator, hence radar was excluded as a suitable technique.

Gamma-radiation measurement systems are commonly applied for level surveillance applications. Usually the measurement direction is horizontally. Placing such a system vertically may provide improved grate monitoring possibility at the fuel feeding location.

Laser and gamma-radiation measurement systems seem to offer the greatest potential as monitoring measurement systems. It can be recommended that continued development of such systems is needed. This should be done in close cooperation with manufacturers in order to develop a tailor-made monitoring system.

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	1
1.1	MÅLSÄTTNING	2
1.2	PROJEKTBESKRIVNING.....	2
1.3	STATE-OF-THE-ART – MÄTNINGAR I PANNOR	2
2	SIGNALBEHANDLING	12
2.1	SIGNALKLASSIFIKATION	13
3	BESKRIVNING AV FÖRSÖK.....	16
3.1	GÄRSTADVERKET	16
3.2	PANNA 2.....	16
3.3	FÖRSÖKUPPSTÄLLNING	17
4	LASER	19
4.1	ALLMÄNT.....	19
4.2	PANNMILJÖNS PÅVERKAN PÅ LASERSTRÅLEN.....	26
4.3	LASERSENSORER I FÖRSÖK	26
4.4	RESULTAT AV LASERFÖRSÖK MED ODS 96 OCH LASE ELD P	27
4.5	RESULTAT AV LASERFÖRSÖK MED RIEGL	30
5	ULTRALJUD.....	33
5.1	ALLMÄNT OM ULTRALJUD	33
5.2	LJUD ABSORPTION	35
5.3	ÖNSKADE EGENSKAPER HOS ULTRALJUD I PANNA.....	36
5.4	ULTRALJUDSSENSOR I FÖRSÖK I PANNA.....	36
5.5	RESULTAT AV ULTRALJUDFÖRSÖK	37
6	RADAR	41
6.1	ALLMÄNT RADAR.....	41
7	GAMMAMÄTARE.....	42
7.1	ALLMÄNT.....	42
7.2	NOGGRANNHET VID ROSTÖVERVAKNING	44
7.3	ANDRA APPLIKATIONER	48
8	EKONOMISKA ASPEKTER	50
9	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	51
9.1	OLIKA MÄTPRINCIPERS LÄMPLIGHET I ROSTÖVERVAKNINGSSAMMANHANG	51
9.2	MÄTINSTRUMENTENS PLACERING.....	55
9.3	KOMMERIELLT TILLGÄNGLIGA MÄTSYSTEM ELLER EN PROTOTYP?	56
10	REKOMMENDATIONER OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGS- ARBETE	59
11	REFERENSER	61
BILAGA 1 - MÄTSERIER MED ODS 96 5M.....		1
BILAGA 2 - MÄTSERIER MED LASE ELD P 20		4

1 Bakgrund

Förbränning i rostpannor innebär ofta en ojämn förbränning med fluktuerande temperatur och gassammansättning som följd. Konsekvenserna blir ofta en instabil last och större risk för högre emissionsnivåer av miljöfarliga ämnen. Inte minst gäller detta då avfall används som bränsle. Orsakerna till den ojämna och instabila förbränningen kan vara att bränslebädden är ojämnt fördelad, dåligt omblandad och/eller att bränslekvaliteten skiftar.

Idag regleras pannan i huvudsak på signaler uppmätta i rökgasen efter själva förbränningsrummet, trots att själva grundorsakerna till den ojämna förbränningen ofta beror på bränslet eller bränslebädden. Denna typ av reglering medför fördröjningar, bl.a. beroende på den tid bränslet tar att transporteras till rostens aktiva förbränningsdelar och den tid som gasen måste transporteras innan den når givarna. Övervakning av förbränningen på rosten skulle kunna möjliggöra en snabbare reglering av pannan och därigenom jämnare förbränning. Anledningen till att automatiserad bränslebäddsövervakning knappt existerar idag är svårigheterna att mäta i förhållandena förknippade med pannmiljön, såsom temperatur, värmestrålning och stoft- och partikelhalt.

För att uppnå de skärpta miljökrav som ställs på förbränning kommer en snabbare reglering av rostpannor att krävas. Detta kan göras genom att optiskt mäta bäddens geometri, mäta temperatur eller temperaturdifferenser samt att mäta och analysera förbränningens karaktäristik. EU:s direktiv om förbränning av avfall (direktiv 2000/76/EG den 4 december 2000 om förbränning av avfall) innehåller nya villkor och skärpta krav på utsläpp till luft och vatten från avfallsförbränning. För att kunna följa direktivet krävs att man kan visa att förbränningsgaserna från avfallet har en uppehållstid vid en temperatur på minst 850°C av minst 2 sekunder. Direktivet innebär i praktiken att det i många fall krävs en förbättrad övervakning av bränslebädden.

En ojämnt fördelad bränslebädd kan få som konsekvens:

- genombränningar med omfördelning av luft till frilagda rostzoner
- ojämn gasproduktion
- ojämn bränsleeffekt
- svårigheter att minimera emissioner och oförbränt
- svårt att kontrollera utbränningen av askan

Med en bättre kontroll och styrning av bränslebädden erhålls en jämnare gasproduktion som ger mindre emissioner och mindre variation av utsläppen över tiden. Halten oförbränt i askan och stoftet skulle också kunna reduceras med högre verkningsgrad som följd. Den genomsnittliga lasten skulle också kunna ökas med en stabilare förbränning. En stabil förbränning skulle av ovan nämnda skäl leda till lägre driftkostnader, bl.a genom att behovet av stödelning minskar.

För att en förbättrad reglering skall uppnås krävs kännedom om det momentana tillståndet av bränslebädden. Signalerna från rostövervakningssystemet måste vara tillförlitliga och användbara för vidare behandling i reglersystemet av rosten.

1.1 Målsättning

Målet för arbetet har varit att praktiskt prova och utvärdera nya metoder att övervaka förbränningsrostar. Projektet har varit inriktat mot att ta fram kunskap om olika sensorers användbarhet med målet att finna driftinstrument som ger driftsäkra och repetitiva signaler. Arbetet förväntades ge en jämförelse av sensorernas signaler med det som okulärt eller med andra instrument kan iakttas på bädden, t.ex. stoftuppkast, ogenomsiktliga flammor, täckt/bar rost etc.

Målet har också varit att det förväntade resultatet skulle kunna ligga till grund för att utveckla styrstrategier för reglering av rostförbränning med hjälp av sensorer.

1.2 Projektbeskrivning

Projektet syftar till att prova och utvärdera nya, i detta sammanhang ej tidigare provade, mätmetoder för rostbäddövervakning. De mätmetoder som ansetts ha störst potential och därmed utvärderats är laser, ultraljud, radar och gammamätare.

Projektet inleddes med en fördjupad litteraturstudie. Litteraturstudien gav knapphändigt resultat, då relativt lite har gjorts inriktat mot fastbränsleförbränning.

Återförsäljare och tillverkare av nivågivare och avståndsmätare baserade på laser, radar, ultraljud och gammamätare har kontaktats. Lämpliga givare har lånats ut och försök har sedan genomförts med laser och ultraljud på Tekniska Verken i Linköpings anläggning, Gärsdäverket. Under litteraturstudien och under projektets gång har även fakta samlats in om de olika mätmetodernas fysikaliska egenskaper, som kan vara relevanta för försöken. Försöken har sedan utvärderats och resultaten analyserats.

Marknaden för sensorer för bäddövervakningsändamål är relativt begränsad jämfört med det totala användningsområdet för sensorer inom övrig industri, t.ex. bilindustrin. Detta innebär att möjligheterna att utveckla sensorer speciellt för rostövervakning är begränsade av ekonomiska skäl. Strategin inom projektet har därför varit att främst undersöka sensorer av ”general purpose”, som kan köpas från ”hyllan” och ges en ny tillämpning.

I samband med projektet har även en filmfrekvens bildbehandlats, för att påvisa bildanalysens möjlighet att anpassas till pannmiljön.

1.3 State-of-the-Art – Mätningar i pannor

Under de senaste åren har en hel del idéer kläckts och några projekt genomförts med målet att förbättra rostövervakningen i pannor. En del av projekten har varit inom ramen för Värmeforsk, men även pannstillverkare, pannägare m.fl. har arbetat för att få fram ny

kunskap inom området. Speciellt inom IR-tekniken har försök i pannor genomförts, både med spotgivare och kameror, med blandat resultat. Det har även pågått försök med laser i förbränningsssammanhang, om än för andra syften än rostövervakning. Trots att detta projekt skall utvärdera nya metoder, har de projekt och metoder som redan genomförts genererat värdefulla erfarenheter av mätningar i pannmiljö. Nedan presenteras ett urval av vad som gjorts och skrivits med relevans för detta projekt.

1.3.1 Använda rostövervakningsmetoder idag

År 2000 genomfördes en analys av vilka rostövervakningsmetoder som idag används i avfallsförbränningsverk. I rapporten "Metoder för rosterövervakning, en dagslägesbestämning" [1] analyserades dagsläget genom en litteraturstudie, en enkätundersökning samt intervjuer med användare och forskare. Rapporten sammanfattar optiska och akustiska mätmetoderna som finns beskrivna i samband med rostpannor.

Syftet med enkätundersökningen var att få svar på vilka system man använder idag och vad man har för visioner vad det gäller rostövervakning. Undersökningen visade att det fanns önskemål om att rostövervakning skall bidra till jämnare förbränning samt till upptäckt av eventuella problem med bränslet vid inmatningen eller på rosten. Man vill kunna styra rosten på ett sådant sätt att emissionerna minimeras.

Av rapporten framgår att videoövervakning förekommer på nästan samtliga pannor och är till stor hjälp för operatörerna. Några få anläggningar hade provat bildanalys som ett led till förbättrad reglering av rosten. Problemet med bildanalyserande system är att lågor och partiklar i förbränningsmiljön begränsar sikten. Utvecklingen inom området går dock fort framåt och tekniken kan bli intressant för rostövervakningsmetod. IR-kamera användes framförallt av pannleverantören Martin i de flesta av sina större avfallsförbränningsanläggningar för övervakning och styrning av rost. Systemet fungerar bra men är dyrt. Erfarenheterna av IR-spotmätare för mätning av temperaturen på rosten visade att det var svårt att få genomslag för metoden vid kontinuerlig drift p.g.a. igensättning. Det finns dock exempel då IR-pyrometern fungerat bra. Lasertekniken var oprövad som rostövervakningsmetod, men ansågs intressant då scanning av lasern kan ske från ett mätställe för att täcka in en ordinär rost från inmatning till utbränningszon [1].

1.3.2 Utvärdering av IR-sensorer vid rostövervakning, i kombination med bildanalys

1995-1996 genomförde TPS ett projekt med målet att ta fram en bäddstyrningsmetod för att automatiserat kunna driva pannor med samma eller bättre värden än de man nu kortvarigt kan uppnå genom manuella insatser [2]. Man eftersträvade också att metoden skulle vara ekonomiskt konkurrenskraftig och gå att kombinera med befintligt reglersystem.

Valet av sensor till försöken föll på IR-känsliga sensorer för mätning av temperaturer/bäddavbränning. Med denna information kunde det vara möjligt att styra

luftfördelningen respektive styra bränslefördelningen på rosten på ett bättre sätt. Andra givare och system diskuterades som alternativ, men uteslöts p.g.a. att de ansågs vara praktiskt orealistiska eller alldeles för dyra.

Praktiska försök med lämpliga IR-sensorer genomfördes på olika anläggningar och i laboratorium för att ge svar på:

- Finns lämpliga IR-sensorer för att mäta temperaturens fördelning över bränslebäddens yta
- känslighet för störning av andra IR-strålkällor i ugen
- erforderlig bildupplösning och temperaturupplösning
- bäddtemperaturens fördelning som funktion av olika förbränningsbetingelser
- hur informationen kunde användas för att utveckla en styrstrategi för att reglera fördelning av primärluft, rosthastighet och bränsleflöde

I analysen och utvärdering av tillgänglig IR-teknik i rapporten är det konstaterat att den temperatur en IR-sensor ”ser” påverkas av flera faktorer. En uppmätt temperaturförändring med IR-sensor kan bero på en förändring hos bädden, men den kan även bero på att transmissionen eller absorptionen av IR-strålningen i mätsträckan förändrats (t.ex. stofthalten har ökat/minskat), eller att emissionen av IR-strålning förändrats på mätsträckan eller att strålningen p.g.a. reflektion förändrats. Sammanfattningsvis konstaterades att mätbetingelserna har stor betydelse för hur representativ den uppmätta bäddtemperaturen kan bli. Placeringen av sensorn har stor betydelse för att reducera störningarna. En fråga som projektet ville besvara var vilken noggrannhet som krävs för att få en optimal information för processtyrningen skall erhållas.

Genom bildbehandling/analys av de upptagna IR-bilderna är det t.ex. möjligt att presentera komplicerad information på ett överskådligt sätt, kontrollera flamfrontens läge och förflyttning, mäta temperaturfördelning samt detektera kratrar/genombränningar.

Experimentell undersökning av IR-teknik

I laboratorium undersöktes hur strålning från flammor kan ge mätfel vid bestämning av bäddtemperaturen. Man studerade också lämpligt IR-våglängdsfönster för mätning av bäddtemperaturen.

Sammanfattningsvis kunde konstateras att med hjälp av IR-sensorer som arbetar i det nära infraröda området är det möjligt att bestämma bäddtemperaturen under förutsättning att denna ej är lägre än ca 500°C. Vid mätning i det nära infraröda området är emellertid den relativa störningen av strålning från flammor väsentligt större än om temperaturen mäts i intervallet i det rena infraröda området.

Fältförsök

Man gjorde vidare försök med tre olika IR-kameror ute på flera anläggningar. Ett centralt problem vid tolkning och utvärdering av uppmätta temperaturer var att avgöra om det var enbart strålningen från bädden som registrerats, eller om störningar (flammor och stoft) i mätsträckan påverkat mätresultatet.

Resultaten av fältförsöken visade betydande variationer i bäddtemperaturen och att dessa skillnader kunde identifieras med hög upplösning. Det går således att med hjälp av IR-sensorer mäta/detektera förbränningsparametrar som ej kan mätas med andra konventionella metoder.

Man konstaterade att en placering av sensorn med långa siktsträckor genom lysande flammor bör undvikas. Det visade sig att placering av sensorn i övre eldstadsrummets tak eller vid bränsleinmatningen gav sämre information än t.ex. vid askutmatningen. I allmänhet så ökar luftöverskottet samtidigt som andelen kolväteflammar minskar räknat från avgasningszonen och nedåt mot askutmatningen. Andra störkällor är uppvirvlande stoft som ger transmissionsförändringar i pannatmosfären. Vid val av placering är också synvinkelbegränsningar och parallaxfel viktiga att ta hänsyn till. Likaså måste skydd mot hetta och stoft tas med i beräkningen.

I diskussionen om krav på sensor/kamera framkommer att noggrannheten hos mätutrustningen inte är en kritisk faktor under förutsättning att den tids- och ytmässiga upplösningen är tillräcklig för att kunna urskilja bädden och sortera bort störningar. Störningar som uppträder i bädden är antingen orsakade av globala fel, t.ex. en uttunnad bädd, alternativt störningar av enstaka bränslebitar. Det finns ingen anledning att åtgärda det lokala felet, utan det är helhetsbilden över en betydligt större yta som är intressant. Slutsatsen var att det inte ställs några höga krav på upplösning på sensorn samt att det heller inte ställs några höga krav på styrsystemet vad gäller snabbhet [2].

1.3.3 Rostövervakning med IR-spotmätare vid inmatningen

Under namnet ”Möjligheter till förbättrad drift av skogsindustrins barkpannor genom optimerad förbränningsteknisk styrning” finns ett projekt beskrivet i tre olika Värmeforskrapporter [3], [4] och [5].

Projektets övergripande mål var att utveckla och demonstrera modifieringar och metoder som ger skogsindustrins barkpannor möjlighet till en bättre drift, med speciell inriktning mot snabba laständringar och växlande bränslekvaliteter av bark och fiber.

Den första etappen är en kartläggning av pannbeståndet och analys av driften. Drygt 20 anläggningar ingick i projektet [6].

I den andra etappen har olika typer av förbättringsåtgärder beskrivits och förklarats. Arbetet har bl.a. inkluderat omfattande mätningar i och utanför eldstäderna i typpannorna samt matematiska simuleringar, dels för att beskriva utgångsläget och dels för att testa ett antal förbränningstekniska lösningars möjlighet till praktisk tillämpning [7].

I den sista etappen har en stor del av de förbättringsåtgärder som tidigare föreslagits använts vid moderniseringen av en av typpannorna, Billeruds AB:s 40 ton bark/slam barkrostpanna i Karlsborg. Modifieringarna ledde till högre lastförmåga och låga CO- och NO_x-halter. En av de genomförda modifieringarna var att införa ett automatiserat

styr- och reglersystem för rosttäckningen och luftfördelningen med hjälp av IR-spotmätare. Detta för att erhålla en jämn och utbredd rosttäckning och minska flödet av ”falsk” sekundärluft. Istället för att indirekt ställa in volymflödet vid bränsleinmatningen med ledning av kameror som visade förbränningszonen, ville man mäta den verkliga bäddutbredningen på rosten vid inmatningsschakten. Tre IR-spotmätare placerades i tändvalvets tak och riktades in på den delen där bädden börjar. Torkrosten skall där vara delvis täckt, delvis otäckt, med bränsle. Den otäckta delen av torkrosten har i stort sett samma temperatur som tubvattnet, d.v.s. ca 220°C, medan det nyss inmatade bränslet har en temperatur mellan ca 0 och +30°C. Eftersom IR-spotmätarna känner av yttemperaturen så går det med hjälp av medelyttemperaturen uppskatta hur stor del av torkrosten som är täckt med bränsle. Om bränsleflödet är stort sjunker medeltemperaturen och om bränsleflödet är för lågt ökar den betraktade ytans medeltemperatur.

Under en stor del av den inledande intrimningstiden gav IR-spotmätarna svar på var bränslebädden hade sin början. Vid flera återkommande tillfällen indikerade dock en eller flera av givarna temperaturer över det maximala området 250°C, vilket ledde till att styrsystemet uppfattade det som att större delen av torkrosten låg bar utan bränsle. Orsaken till denna felfunktion var att stora mängder glödande kolpartiklar följde med gasströmmar upp till torkzonen från förbränningszonen och lade sig på det färskas bränslets yta. Det fanns ingen möjlighet att åtgärda gnistproblemet och beslut togs att koppla bort IR-spotmätarsystemet från pannan. [8]

1.3.4 Tidigare försök med lasermätningar i storskalig panna

Lund Laser Center vid Lunds Universitet, avdelningen Förbränningstekniskt Centrum har i tre projekt genomfört försök med laser i storskaliga pannor. I de två första projekten mättes temperaturen och i det sista gjordes en visualisering. Man har alltså inte mätt distans. De använda mätmetoderna, CARS (Coherent Antistokes Raman Scattering) och LIF (Laser Induced Fluorescence), används till att mäta temperatur alternativt bestämma gassammansättning. Det går inte att använda dessa metoder till distansmätning, varvid inga tekniska principer av metoderna kommer förklaras här. Försöken är emellertid intressanta eftersom vissa problem som förekommit under försöken beror på pannmiljöns påverkan av laserstrålen.

Temperaturmätningar med laser i en naturgaseldad fullskalepanna

1992 genomfördes temperaturmätningar på en naturgaseldad panna vid Heleneholmsverket i Malmö. Man använde sig av en speciell variant av CARS-metoden, som verkar med en signal 40 ggr högre än den vanliga CARS-metoden. Temperaturmätningarna genomfördes framför två av brännarna, samt mellan dem. Metoden behöver två öppningar i linje i pannan, en för sändaren och en där detektorn sitter. I försöken användes en pulsad YAG laser och en dye laser, båda med frekvensen 10 kHz och pulslängden 10 ns.

Vid temperaturmätning är det inte möjligt att använda sig av den konventionella CARS-metoden i en panna. Dels kan laserstrålen skapa andra signaler, som kan interferera med den intressanta signalen som krävs vid CARS-metoden. Dels kan partiklarna i

pannatmosfären dämpa laserstrålarna. Partiklarna kan dessutom medverka till att den högintensiva laserstrålen ger en break through. Break through innebär ett lasergenombrott, vilket kan ske om man fokuserar laserstrålar hårt och man helt enkelt joniserar luftmolekyler. Detta uppfattas som en gnista i fokus. Om det finns partiklar närvarande ökar sannolikheten för break through dramatiskt. De nämnda problemen märktes inte av i försöken i den naturgaseldade pannan, men det är troligt att de är påfallande i kol- eller oljeeldade pannor.

Vid försöken hade man problem med distorsion av laserstrålen. Med distorsion menas att strålen såväl kan brytas av samt att strålmoden förändras pga. brytningsindex variationer. Laserstrålen förvrängdes, både i riktning och i formen, vilket berodde på diffraktionen som blir till följd av att laserstrålen skall passera kalla och heta gasstråk i pannatmosfären. Den uppmätta temperaturen framför brännaren närmast sändaren blev därför en helt annan än temperaturen framför den närmast detektorn. Apparaturen som användes var också utvecklad för småskaliga försök och inte anpassad för storskaliga, såsom en 150 MW panna. Resultaten blev därför inte så lyckade. [9]

Temperaturmätningar med laser i en biobränsleeldad panna

I nästa etapp genomfördes temperaturmätningar på en biopulvereldad panna, 75 MW, Jordbro. Samma lasergivare som i föregående projekt användes. I projektet uppfördes även en 50 kW brännare i laboratoriet, Förbränningstekniskt Centrum i Lund, för att kunna jämföra laserförsök med olika bränslen i en kontrollerad miljö. Brännaren kunde använda biopulver och/eller gas som bränsle. Försök inleddes på brännaren, dels med CARS-metoden, dels med LIF-metoden. Försöken med LIF-tekniken visade att då brännaren använde propan som bränsle fungerade diagnostiseringen väl. Byttes bränslet ut till biopulver detekteras ett våglängdsspektra som gör diagnostiseringen av retursignalen svår. Vid CARS-försöken på brännaren var 10% av de detekterade lasersignalerna så förvrängda att temperaturen var omöjlig att avläsa. Exkluderades dessa pulser blev mätningarna acceptabla.

Försöken fortsattes med CARS-metoden i pannan i Jordbro. Parallellt genomfördes temperaturmätningar med sugpyrometer för jämförelse. Då genomsnittsvärden av CARS-mätningarna jämfördes med sugpyrometermätningarna avvek CARS endast 3% av sugpyrometervärdena. Standard deviationen vid CARS var dock större än normalt vid konstant temperatur. CARS-tekniken lyckades registrera stora temperaturfluktuationer på vissa ställen i pannan, något sugpyrometern inte klarade. I snitt visade sugpyrometern något högre temperatur än CARS-metoden [10].

Visualisering med laser i en biobränsleeldad fullskalig panna

Detta projekt har försökt hitta metoder att med hjälp av laser kunna visualisera lufttillförsel i förbränning. Visualiseringen kan ske med hjälp av två laserstrålar, tvådimensionellt. Man hittade även under projektets gång en metod att visualisera ammoniak/vatten injektionen i pannan. Försök genomfördes åter på 50 kW brännaren och på pannan i Jordbro, med LIF-metoden samt med Mie Scattering, dels med, dels utan partikeltillsatts i fluiden.

Vid Mie scattering är bakgrunds ljuset, bruset, ett problem. Metoden fungerar bara om spridningen från de tillsatta partiklarna är starkare än spridningen från partiklarna som naturligt finns i förbränningsgasen. Vid LIF-metoden kan ett filter ta bort bruset [11].

1.3.5 Multisensorteknik

Även om det skulle finnas många tillförlitliga mätmetoder för bränsleövervakning i pannor idag, kan informationen från en mätparameter bli knapphändig för rostövervakning. Ett exempel är användning av infraröd kamera för observation av bränsleförbränningen i rostpannor. Kameran mäter temperaturfördelningen, vilket sedan skulle kunna styra inmatningen av bränsle samt lufttillförseln zonvis. I detta fall skulle metoden kunna ge en förbättrad temperaturfördelning, men de ger ingen information om inmatad bränslemängd och energimängden i de olika zonerna. Inmatningen riskerar därmed bli kraftigare än optimalt med stora ämnes- och temperaturfluktuationer som följd. Med metoden finns därmed ingen garanti för att ångflödet från pannan blir stabilt. En annan metod för att reglera bränsleinmatningen är att den styrs av syrehalten i pannan. Med en förhöjd syrehalt drar styrsystemet slutsatsen att bränslenivån är för låg i pannan, alternativt att bränslets energiinnehåll är för lågt, och därmed ökas inmatningen. Om den verkliga anledningen till den höga syrehalten var att bränslet i pannan var fuktigare än normalt, kan den ökade inmatningen leda till en alltför stor energimängd i pannan, med minskad syrehalt, temperaturförhöjning, effektökning och en ökad kolmonoxidhalt som följd. Återigen kan styrsystemet inte avgöra om den nu rådande syreminskningen beror på ett förhöjt energiinnehåll i bränslet eller om orsaken är en ökad bränslemängd på rosten. Styrsystemet kommer kraftigt dra ned på bränsleinmatningen och pannan riskerar att hamna i obalans.

Med **multisensorteknik** menas en kombination av två olika mättekniker som i viss mån kan komplettera varandra och därmed ge en stabilare drift. Martin GmbH [12] har tagit patent på en lösning där en radar, alternativt ett par videokameror i olika vinklar, mäter den tredimensionella fördelningen av bränslet i kombination med att en eller flera IR-kameror mäter temperaturen på bädden. Med bränslebäddstopografin samt bäddtemperatur skulle mycket goda slutsatser kunna dras av förbränningsprocessen och den lokala energialstringen i pannan. Informationen skulle kunna användas till att styra primär- och sekundärluft, rökgasåterföring, inmatare, roststavar, askutmataren, luftförvärmare m.m.

Om radarn mäter bäddens topografi precis vid inmataren, skulle den kunna tjäna som en "nödbroms" för att förhindra en alltför kraftfull bränsleinmatning vid lågt värmevärde i bränslet. Alternativt skulle radarn kunna mäta över hela rosten. Då möjliggörs en förfinad lokal reglering av olika zoner på bädden, beroende på förbränningsförloppet på rostens olika delar.

Ett symptom i pannan kan ha många grundorsaker. Om t.ex. roststavtemperaturen stiger till över den tillåtna kan det bero på att bäddhöjden är för låg med direkt värmestrålning på stavarerna som följd. Det kan också bero på att syrehalten i primärluften är för hög, vilket leder till en för snabb förbränning. Grundorsakerna kan vara att bränsleinmatningen är otillräcklig eller att omblandningen av bränslet är för dålig. Den

verkliga anledningen skulle kunna fastställas med mätvärdena från radarn i kombination med IR-kameran. På liknande sätt skulle det gå att avgöra vad en förhöjd CO- eller O₂-halt beror på.

Martin GmbH menar att, beroende på pannans utformning, skulle det gå att med en kombination av olika tekniker reglera bort ojämnheter på bädden, både tvärs och längsmed pannan. Det skulle även gå att dra slutsatser om fukthaltigt bränsle; om radarsensorn detekterar en låg bränslebädd och IR-kameran en dålig förbränning, betyder det att förbränningen inte lever upp till det förväntade med den aktuella bränslebädden. Anledningen kan antingen vara mycket fukt i bränslet alternativt att en betydande andel av bränslet är svårförbränt.

Vi har dock inte funnit någon dokumentation eller någon anläggning där radartekniken använts. Huruvida Martin GmbH har provat dessa metoder i drift är således oklart.

1.3.6 Bildanalys

Historik och teori

Bildanalys bygger på möjligheten att manipulera en signal från en videokamera och på så sätt förtydliga händelser eller trender i det system som kameran övervakar. Det kan handla om att räkna partiklar, att filtrera bort brus i en bild eller att öka tydligheten i bilden genom att manipulera med färger.

Tekniker inom bildbehandlingsområdet började användas redan på 70-talet men p.g.a. att det kräver en hel del datorkraft så är det först de senaste 10 åren man har börjat använda det generellt. Detta innebär också att mängden arbetsområden där bildanalys används växer ständigt.

Under en följd av år har bildanalys bearbetats som en framkomlig väg att övervaka en rost. Försök har också gjorts i ett antal kommersiella pannor i Sverige (Hudiksvall, Skinnskatteberg m.fl.). Dessa försök har byggt på att mäta bäddlängd från askutmatningen till flamfronten.

Videokameror monteras i dag standardmässigt i avfallspannor men det börjar också bli vanligare i andra fastbränslepannor. Detta gör att potentialen att bearbeta signalen på ett mer automatiserat sätt finns.

Genomförda försök

I samband med detta projekt har en film från Burmeister & Wein pannan i Enköping använts för att illustrera hur bildanalys kan användas. Denna film visade inga detaljer men hur bilden med enkla medel, on-line, kan hjälpa till att se partiklar och långsamma förbränningsförlopp. Det skall dock sägas att filmen inte är tagen från en ideal kameraplacering utan mer kan ses som en test av metoden.

Nedanstående bilder är från försöken i Enköping och visar vad man kan göra med att ändra kontrasten, Figur 1, samt medelvärdesbilda signalen i tid, Figur 2. Figur 1 och Figur 2 är tagna och redigerade av Technology Nexus AB.



Figur 1 Kontrasten i den vänstra bilden är ändrad och partiklarna framträder och är möjliga att räkna automatiskt.

Figure 1 The right image shows how the contrast has been modified and the number of particles are now possible to count automatically.



Figur 2 I den högra bilden har signalen medelvärdesbildats under någon minut. Detta gör att stoftp Partiklar filtreras bort samtidigt som stråk i förbränningen blir tydligare.

Figure 2 The right image shows the result of computing the average of the signal over one minute. In this way the dust particles are eliminated from the image and the flames get clearer.

För att täcka in hela rosten, både före och efter flamfronten, kan det vara intressant att ha kameror både i fram och baksidan eftersom ojämnheter i bränslet syns bäst vid inmatningen och ojämnheter i förbränningen syns bäst från baksidan. Det ideala vore att kunna titta igenom flamfronten och på så sätt kunna se hela rosten i en bild.

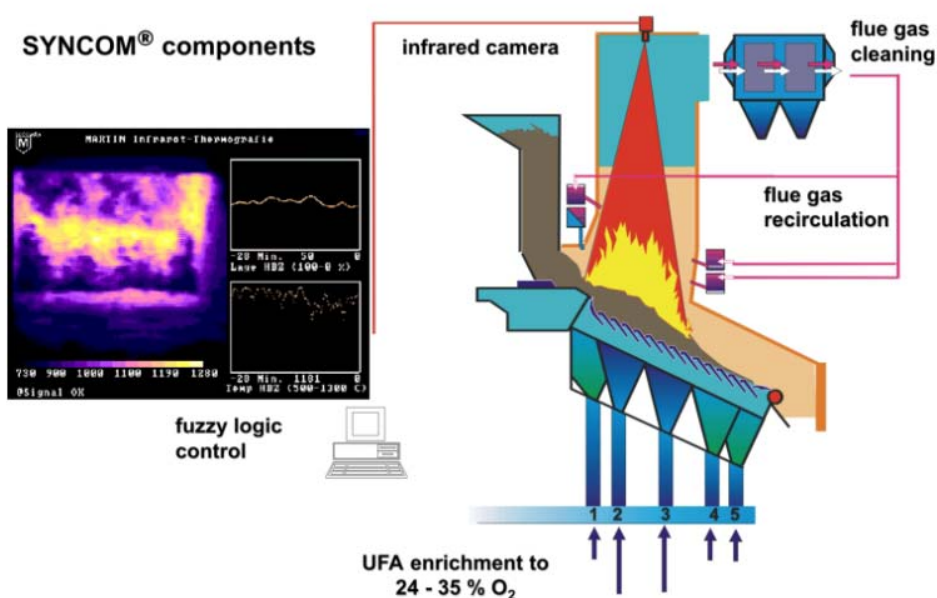
På Birka värme i Hudiksvall har man haft ett system där man har försökt att mäta bäddlängd med hjälp av bildanalys. Försöket är dock avbrutet med motiveringen att systemet inte var tillförlitligt. Detta berodde på att flamfronten rörde sig och det var svårt att identifiera vad som var den egentliga flamfronten. Kamerorna används dock fortfarande för okulärbesiktning av förbränningen [13].

Övervakning av rost med IR-kamera i kombination med bildanalys används kommersiellt av Martin GmbH. Detta system bygger på en IR-kamera som sitter i

panntaket och tittar igenom hela förbränningen ner på rosten. Den bild man får ger en uppfattning om temperaturfördelningen på rosten.

Detta system kan styra pannan automatiskt men i ett par fall vet vi att man använder det som komplement till övrig reglering. Martin GmbH levererar systemet som extrautrustning till avfallsförbränningspannor [13]. Ett problem med systemet är att det är dyrt i inköp och kräver ombyggnader i befintliga pannor.

Detta system fungerar bara i Martins pannor då de använder sig av en förbränningsteknik som är lämplig för det. Förbränningen bygger på att det mesta av luften är primärluft och endast mindre delar används som sekundär och tertiärluft. Detta medför att det mesta av förbränningen sker på rosten och gasen blir lätt att se igenom.



Figur 3 Övervakning av rost med IR-kamera kopplad till bildanalys

Figure 3 Grate monitoring by means of IR-cameras combined with image analysis.

2 Signalbehandling

Många mätinstrument fungerar med principen att sändaren skickar ut en signal, det kan vara laser, ultraljud, gammastrålning, etc. som sedan detekteras igen av instrumentets givare. Detektionen av den utskickade signalen kan, efter reflektion, ske i samma givare som sände ut signalen. Alternativt detekteras signalen av en separat mottagare, antingen placerad strax bredvid givaren eller placerad på motsatt sida om det uppmätta objektet. I samtliga fall genereras en elektrisk signal som signalbehandlas vidare efter detektionen. Signalbehandlingen påverkar det uppmätta resultatet och det är därför viktigt att väga in denna del då resultat utvärderas vid mätningar.

Begreppet signalbehandling är brett och sker i flera steg från att signalen sänds ut till att den presenteras för användaren. För att klargöra detta presenteras här hur de olika signalbearbetningsstegen kan se ut.

1. Råsignalen

Råsignalen sänds ut och detekteras av sensorn, t.ex. en laserpuls. Hur råsignalen in i sensorns detektor ser ut och hur kvaliteten på signalen är, beror dels på den utsända signalens utseende, dels på hur signalen påverkats under transporten i pannatmosfären och dels på hur signalen påverkats av det uppmätta objektets materialegenskaper.

2. Instrumentet

I instrumentet är en signalbearbetning inbyggd som inte kan påverkas av användaren. Signalbearbetningen kan vara analog och/eller digital. I de flesta fall sker dock signalbehandlingen i instrumentet både analogt och digitalt. Den bearbetade signalen levereras sedan i analog och/eller digital form ut ur instrumentet. Även om instrumentets utsignal är analog, kan signalen i instrumentet blivit bearbetad digitalt för att sedan blivit DA-omvandlad till en analog utsignal. Denna del är inbyggd i instrumenten och exakt hur signalen bearbetas är ofta tillverkarens hemlighet och kan inte påverkas av användaren.

3. Användarens bearbetningsmöjlighet

Användaren har sedan möjlighet att bearbeta signalen från instrumentet. Om signalen från instrumentet är analog, kan användaren konvertera den analoga signalen till en digital signal m.h.a en AD omvandlare, för att sedan bearbeta signalen i ett dataprogram. Omvandlaren och programvaran kan vara specialdesignade för sensorn alternativt kan annan utrustning användas. Hur den digitala signalen presenteras för användaren beror på programvaran och dess konfigurerbarhet.

4. Signaltolkningen

Ett fjärde steg, vid fallet rostövervakning, är analysen av värdena för att återge driftsituationen, dvs att ett visst värde eller en kombination av värden betyder en viss driftsituation. Detta steg ligger sedan till grund för regleringen av rosten.

I rapporten är det främst den första delen som utvärderats, dvs hur pannmiljön påverkar råsignalen in i sensorn. Följande del, dvs. hur signalen bearbetas i sensorerna, är okända för de instrument som försök genomförts med. Denna del av signalbehandlingen är dock

viktig för mätinstrumentets lämplighet för ändamålet. En pulsad laser, t.ex. som sänder ut 1000 laserpulser i sekunden, visar inte värdena av alla 1000 pulser, utan bearbetar pulserna till kanske 1 signal per sekund, som användaren får ta del av. I denna del av signalbehandlingen bestäms t.ex. om instrumentets utsignal bygger på det närmaste, det mest avlägsna eller ett medelvärde av de uppmätta avstånden. I avsnitt 2.1 presenteras hur signaler kan klassas och bearbetas.

I steg 2 och 3 sker för det mesta en omvandling av signalen mellan analog och digital form flera gånger. För varje gång signalen AD/DA-omvandlas försämras signalen något, dvs det byggs in ett litet fel i signalen. Så länge signalbearbetningen i instrumentet är okänd för användaren, är det svårt för användaren att påverka detta.

Signalen efter steg 3 kan antingen återges som värden, en kurva från en scannande laser eller en bild. Bilden kan vara en temperaturfördelning från en IR-kamera eller en videobild.

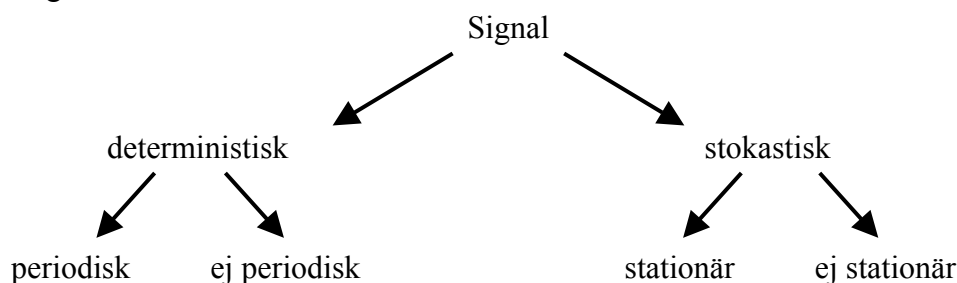
Om signalen efter steg 3 återges som värden, kan tolkningen av dessa värden i steg 4 antingen ske av en person som agerar därefter, alternativt går värdena in i processtyrsystemet direkt.

Vid fallen att signalerna ut från steg 3 är en kurva eller en bild, tolkas dessa manuellt av driftpersonalen i steg 4, som sedan agerar utifrån informationen. Alternativt kan, i steg 4, tolkningen av bilden ske m.h.a av bildanalys, som ligger till grund för processtyrsystemets reglering av rosten.

Detta innebär också att det är viktigt att klargöra sensors uppgift; är det att skapa en styrsignal till ett automatiserat styrsystem eller är det att ge indata för en operatörs beslutsfattande? Många sensorer kan ha ett dubbelt användningsområde. T.ex en IR-spotmeter, som mäter temperaturen i en punkt i pannan, kan tillåtas scanna över bädden för att bygga upp en bild av hela ytan. Bilden kan tolkas av operatören eller bildbehandlas så att entydiga styrsignaler direkt kan tilldelas styrsystemet.

2.1 Signalklassifikation

Mätsignaler kan klassificeras efter de vanligaste signalformerna. En översikt av dessa finns i Figur 4.



Figur 4: Indelning av mätsignaler

Figure 4: Classification of measurements signals

Deterministiska signaler är sådana som kan beskrivas på ett analytiskt sätt och dess signalförlopp är känt. Ett exempel för dessa signaler är överföring och bearbetning av information, t.ex. telefonsamtal, internetkommunikation, etc.. Väl kända exemplar för deterministiska signaler är listad i Tabell 1.

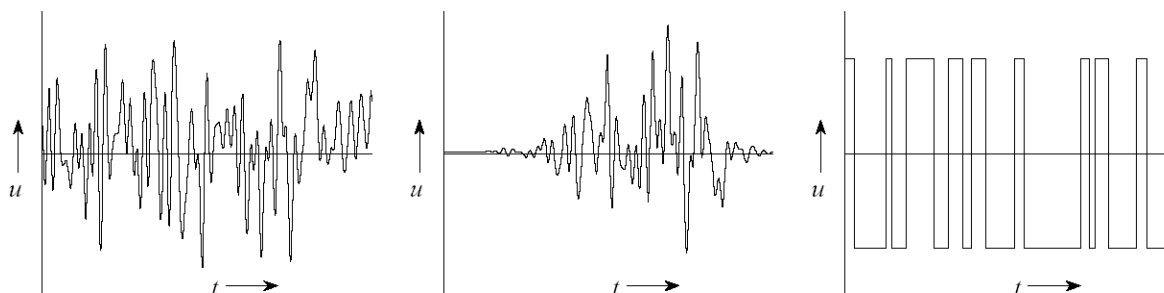
Tabell 1: Exemplar av deterministiska signaler.

Table 1: Examples of deterministic signals.

Beteckning	Beskrivande ekvation
Periodisk oscillation	$x(t) = \bar{x} \sin(\omega t + \varphi)$
Stegfunktion	$\sigma(t) = \begin{cases} 1 & \text{där } t \geq 0 \text{ s; tid } t \text{ i sekunder} \\ 0 & \text{där } t < 0 \text{ s; tid } t \text{ i sekunder} \end{cases}$
Diracimpuls $\delta(t) = \dot{\sigma}(t)$	$\delta(t) = \begin{cases} 1/\varepsilon & \text{där } -(\varepsilon/2) \leq t \leq (\varepsilon/2) \\ 0 & \text{där } t > \varepsilon; \text{ tid } t \end{cases}$

Stokastiska signaler är tillfälliga, deras amplitud, frekvens och fas förändras på ett oregelbundet sätt. En exakt beräkning av signalförloppet är inte möjligt. Däremot kan man beräkna statistiska värden som hjälper till att karakterisera tillfälliga signaler. En matematisk beskrivning av stokastiska signaler är möjlig med hjälp av sannolikhetsberäkningar; t.ex. förväntningsvärde, medelvärde, korrelation och moment tillhör möjliga hjälpmedel från sannolikhetsberäkning. Figur 5 visar typiska exemplar för stokastiska signaler.

Stokastiska signaler är den typ av signaler som förekommer mest i realiteten och därmed också i denna undersökning. Med hänsyn till mätningarna i Gärstadverket och med tanke på stoftuppkastningar och bränsleegenskaper och deras inverkan på förbränningsförlopp kan man konstatera att samtliga mätsignaler klassen av icke stationära, stokastiska mätsignaler.



Figur 5: Stationär, ej stationär signal och binärt brus [14].

Figure 5: Stationary, non-stationary and binary noise [14].

I praktiken är varje signal belastad med störningar. Om dessa störningar oscillerar oregelbundet och ligger på själva mätsignalen, så kan det aritmetiska medelvärdet

bildas, signalspektrumet blir utjämnat. Även signalkvaliteten vid stokastisk störda periodiska signaler kan förbättras, för detta behövs dock en fast referenspunkt med information om signalfasen, t.ex. nollgenomgång som kan användas som triggerimpuls.

De mätinstrumenten som användes i projektet är kommersiella mätsystem. Den exakta signalbearbetning i själva mätsystemet kan ej beskrivas i denna rapport eftersom detta ingår i "företagets hemligheter". Vid användning av dessa system har operatören liten påverkan på mätsignalen.

Industri- och hushållsavfall från bunkern matas in med kran till påfyllnadstrattarna och därifrån vidare in i pannan. Pannan är försedd med en rörlig snedrost som bränslet brinner på. Rostens lutning är 18° relativt horisontalplanet. Den rörliga rosten matar successivt fram avfallet under förbränningen. Det slutförbrända avfallet faller ned i slaggvattnet och transporteras sedan bort till askbunkern.

Lufttillförseln sker genom primär-, sekundär- och tertiärluft. Man har även rökgasåterföring. Temperaturen i pannan varierar mellan $800-1000^\circ\text{C}$ och ett svagt undertryck råder i eldstadsrummet.

3.3 Försökuppställning

Vid mätningarna har instrumenten riktats in genom fönstret som driftpersonalen använder för att kontrollera bränslebädden och elden. Fönstret är placerat mitt på pannans kortsida (baksida) ovanför slaggutmatningen, se Figur 6. Den röda pilen markerar var fönstret sitter.

Figur 7 är tagen snett genom fönstret och visar en del av pannsidoväggen, utbränt bränsle samt slaggnedfallet. Om mätinstrumentet riktas rakt in i förbränningsrummet blir avståndet till rosten ca 4,3 m. Beroende på hur mycket bränsle som ligger i mätpunkten kommer därmed avståndet från mätinstrumentet till bränslebädden bli maximalt 4,3 meter, antagligen knappt 4 m. Avståndet mellan mätinstrumentet och slaggnedfallet är ca 2,4 m.



Figur 7: Förbränningsrum sett från mätplatsen.

Figure 7: View into the incinerator from the measurement location.

Vid lasermätningarna monterades en hylla under fönstret där lasersensorerna placerats under mätningarna, se Figur 8.



Figur 8: Placering av mätinstrument och sidovägg av pannan.

Figure 8: Measurement location and view of side-wall.

Med en ultraljudsensor går det inte att mäta genom glas. Vid de försöken ersattes det befintliga fönstret med en sluten konstruktion där sensorn satt fastmonterad kopplad till ett kylsystem.

4 Laser

4.1 Allmänt

Laser är en förkortning för en speciell typ av ljuskälla och står för **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Den fysikaliska effekten som ligger i bakgrunden är att ljus kan emitteras om elektronerna av det emitterande mediet går från en högre energinivå till en lägre.

En laserstråle består av en monokromatisk, koherent elektromagnetisk våg, och karaktäriseras av dess intensiva ljusstyrka och tunna, direkta stråle.

Hastigheten av en elektromagnetisk våg genom vakuum, c_0 , är konstant och definierad som:

$$c_0 = \lambda f$$

λ	strålens våglängd i <i>nm</i> eller μm
f	den frekvens de elektromagnetiska vågorna oscillerar med i Hz
c_0	hastighet, $2,99792 \cdot 10^8$ m/s.

I ett medium beräknas ljushastigheten c med hjälp av brytningsindex n

$$n = \frac{c_0}{c}$$

Tabell 2 listar brytningsindexen för olika substanser vid normalförhållanden för ljus med en våglängd av 589 nm. Brytningsindexen är inte konstant men en funktion av våglängden λ . I praktiken approximeras n dock oftast med ett konstant värde.

Tabell 2: Brytningsindex för olika material vid $T=20^\circ\text{C}$ och $p=1013$ mbar [15]

Table 2: Index of refraction for different materials at $T=20^\circ\text{C}$ and $p=1013$ mbar [15]

Vatten	1,333	Borkon BK1	1,51	Luft	1,0003
Is	1,31	Bariumoxid	1,98	CO ₂	1,0045
Glas	1,5-1,9	Cesiumoxid	1,79	C ₆ H ₆ (flyt.)	1,501
Kvatsglas	1,459	Diamant	2,4		

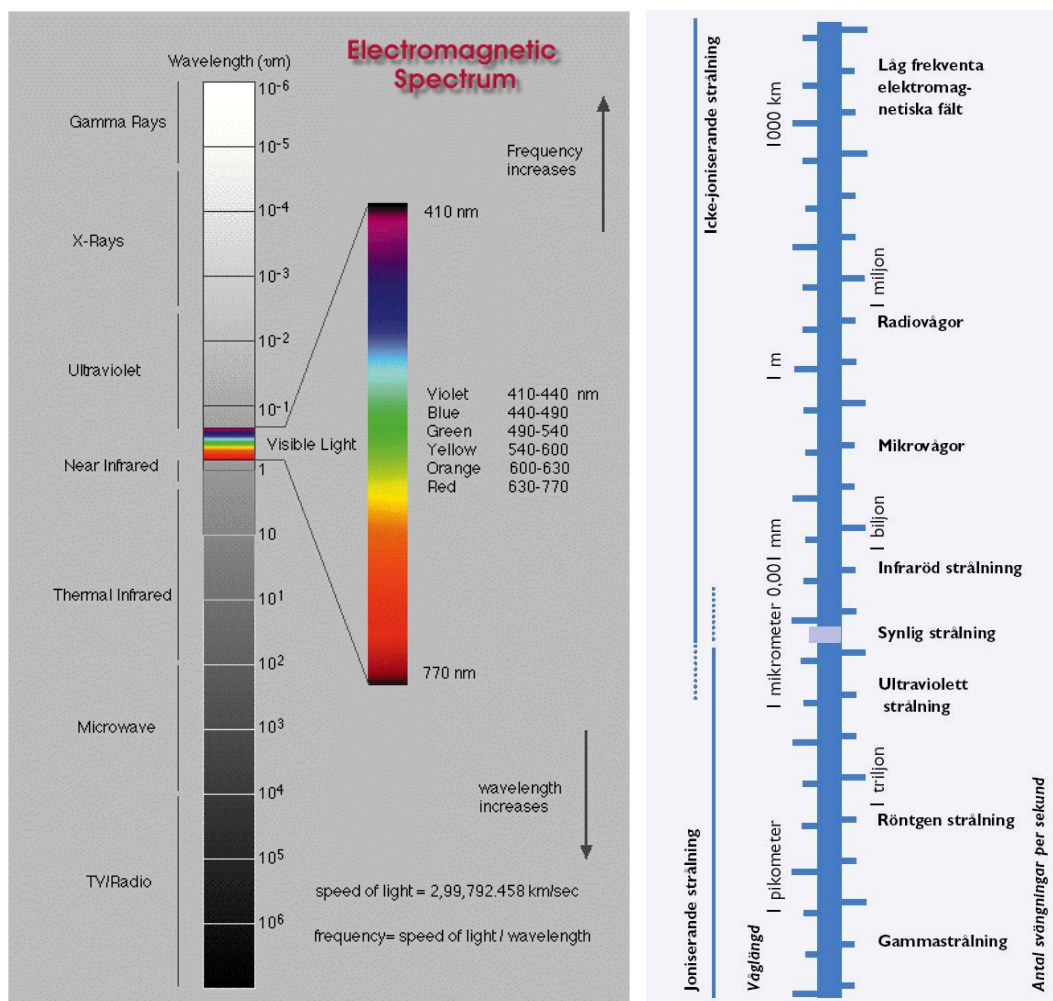
Ljusets hastighet kan antas konstant genom olika gaser, till skillnad från mekaniska vågor (ljud) som påtagligt ändrar hastighet i olika gaser.

Idag finns många olika användningsområden för LASER i tekniken. De vanligaste är:

- Mätningar av temperatur, distans, sammansättning i eller genom gaser
- Spektroskopi
- Materialbearbetning
- Informationsöverföring och lagring (t.ex. CD- / DVD-spelare)
- Medicin

4.1.1 Våglängd

Karaktistiskt för de lasergivare som finns på marknaden är deras våglängd, λ . Figur 9 visar en bild av det elektromagnetiska spektrumet med våglängden i μm och tillhörande namn av just den strålningstyp. De vanligaste lasergivare som finns går från ca 20 μm (infrarött) till UV-strålning i det elektromagnetiska spektrumet.



Figur 9: Elektromagnetiska spektra [16].

Figure 9: Electromagnetic spectrum.

Det finns olika tekniker för att framkalla en laserstråle. För att få en laser att fungera krävs att i huvudsak tre villkor är uppfyllda. För det första behövs ett aktivt medium; atomer, molekyler eller joner som utstrålar strålning i den optiska delen av det elektromagnetiska spektrumet. För det andra måste ett fenomen "population inversion" existera, vilket är ovanligt men kan framkallas m.h.a. "pumping". För det tredje måste det finnas någon form av optiskt "feedback" för att erhålla den samlade monokromatiska laserstrålen. I Tabell 3 ges exempel på olika typer av lasergivare.

Tabell 3 De vanligaste kommersiellt tillgängliga lasertyperna [17]

Table 3: Commercially common laser types [17].

Typ av laser	Aktiva material	Våglängd [nm]	Typisk effekt [J/s]	
			kontinuerligt	pulsat
Kristall-laser	Neodym	1060	10	10^8
	Rubin	694	-	10^8
Diodpumpade kristall-laser	Neodym + dubblingskristall	543 - 473	0,1 0,01	0,01 -
Halvledarlasrar	Galliumarsenid	850	0,01	1
Vätskelasrar	Färgämnen (avstämbara)	350-700	1	10^7
Gaslasrar	Helium-neon	633	0,01	-
	Argon (jon)	514	10	-
	Nitrogen	337	-	10^5
	Koldioxid	10600	100	10^8

4.1.2 Stoftproblematiken – Spridning och Absorption

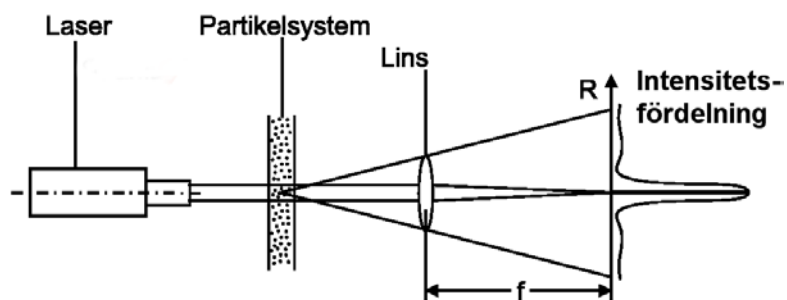
Med spridning menas den fysikaliska processen av böjning eller riktningsändring av en del av en riktad stråle. Spridning av laserljus vid interaktion med stoftpartiklar eller en grov yta är bra exempel på denna process. I partikelmodellen kan spridning uppfattas som en stöt mellan två partiklar. Stöten kan antingen vara elastisk (inget utbyte av energi, bara impuls) eller inelastisk (utbyte av både energi och impuls).

Om våglängden av en elektromagnetisk stråle inte förändras vid spridning, så kallas detta för Rayleigh- eller Mie-spridning, skillnaden kommer att förklaras senare. Om våglängden förändras (dvs. ett utbyte av energi), så kallas det för Raman-spridning.

Mie-spridning beskriver processen spridning av ljus vid partiklar som har en minst lika stor eller större diameter som ljuset våglängd. Denna typ av spridning är beroende av materialegenskaper hos det spridande mediet, dielektricitetskonstanten och elektriska ledningstalet. Spridningen framåt ökar lineärt med partikeldiameter.

Rayleigh-spridning är spridningen av en elektromagnetisk stråle vid en partikel som har en diameter som är mindre än ljusets våglängd. Ljus med korta våglängder, dvs. blå eller ultraviolett ljus sprids starkare än röd eller infraröd. Detta beror på att intensiteten av spridningen är proportionell mot $1/\lambda^4$. Rayleigh-spridning är en vanlig förklaring till varför himlen är blå.

Spridning och även böjning används vid mätning av storleksfördelningar av stoftpartiklar, se Figur 10. Storleksfördelningen kan beräknas med hjälp av intensitetsfördelningen.



Figur 10: Experimentell uppställning för bestämning av storleksfördelning av stoftpartiklar.

Figure 10: Experimental setup for measurement of size distribution of dust particles.

Växelverkan mellan ljus och material kan också uttrycka sig i form av adsorption. Med adsorption menas försvagning av strålen pga. energiöverföringen från strålen till materialet. Oftast syns detta fenomen som värme, dvs. en uppvärmning av det fasta materialet sker. Adsorption är inte en spridnings process, mera en komplementär del av spridning. Adsorption av laserljus används vid en rad olika mätmetoder för bestämning av temperatur och/eller sammansättning.

4.1.3 Intensitet

Intensiteten, I , definieras som effekt, P , per area vinkelrätt mot laserstrålen, A ,

$$I = P/A.$$

Laserstrålens tvärsnitt uppvisar en gaussisk profil, vilket innebär att intensiteten avtar gradvis med ökande radie. Det är därför svårt att bestämma en exakt radie på strålen. Man har valt att definiera strålradien så att 94% av laserstrålens energi ligger inom radien.

Statens Strålskyddsinstitut beslutar hur en laser skall vara utformad, klassificerad och märkt i enlighet med svensk standard SS-EN 60 825, utgåva 1 (1992), kapitel 2, avsnitten 4-9. I dessa föreskrifter avses med laser en teknisk anordning avsedd att alstra elektromagnetisk strålning inom våglängdsområdet 180 nanometer till 1 millimeter huvudsakligen genom processen stimulerad emission.

Lasrar är klassificerad efter deras intensitet i olika klasser.

Klass 1: laser med mycket låg effekt som strålar i det synliga området.

Klass 2: laser med en maximal strålningseffekt av 1 mW som strålar i det synliga området. Blinkreflexen räcker som skydd för ögat.

Klass 3A: Laser med en effekt mellan 1 och 5 mW och en strålintensitet per area av 25 W/m^2 .

Klass 3B: Laser med en effekt mellan 5 och 500 mW.

Klass 4: Laser med en hög effekt av mera än 500 mW. Även diffusa reflexioner från grova ytor kan orsaka skada i ögat eller på huden. Klass 4 kan också förorsaka brand i exponerat material.

4.1.4 Avståndsmätning

Det finns tre olika fysikaliska principer som kan användas för att mäta avstånd med en laser:

1. Triangulering
2. TOF - **T**ime-**O**f-**F**light
3. Interferometri

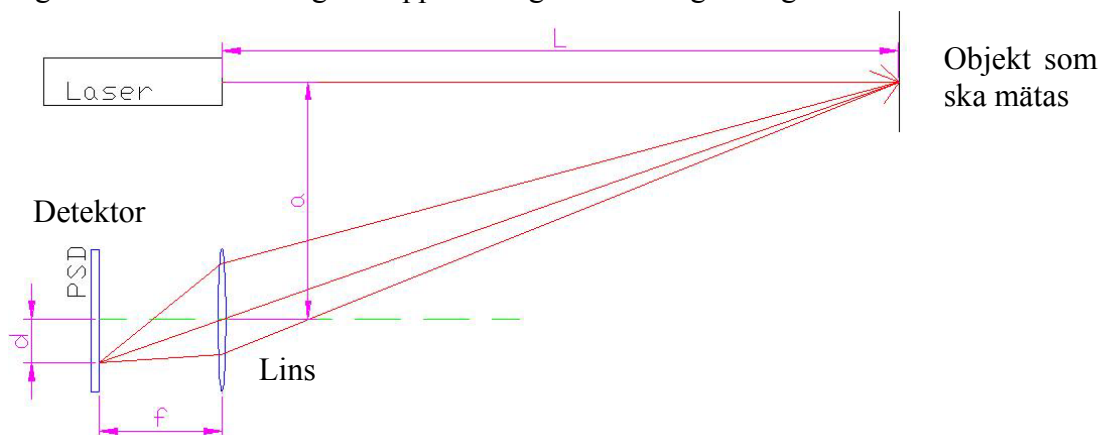
Dessa tre tekniker av optisk distansmätning skiljer sig inte bara på olika fysikaliska teorier men också i upplösningförmågan, repeterbarheten och den absoluta mätnoggrannheten.

Typ 1

Vid triangulering är principen det följande: en ljusstråle träffar objektet som ska mätas. Ljus reflekteras från ytan och ses på en detektor av lämplig typ. Laserkälla, objekt och detektor bildar en rätvinklig triangel. Vinkeln α , se Figur 11, varierar med distansen L mellan objekt och laser. Avståndet L kan beräknas enligt ekvationen:

$$L = \frac{a f}{d}$$

Figur 11 visar en enkel grunduppställningen vid triangulering.



Figur 11: Uppställning av laser och detektor vid triangulering. [18]

Figure 11: Setup of laser and detector for after triangle method. [18]

En vanlig ljuskälla vid triangulering är infraröd laser dioder eller halvledarlasrar.

Typ 2

Vid denna teknik skickar en laserkälla ut en laserpuls som reflekteras av det objekt som ska mätas. Genom att mäta tiden mellan två ljuspulser kan distansen räknas fram med hjälp av ljushastigheten vid det aktuella förhållandet.

Denna teknik lämpar sig vid mätningar över större distanser, i storleksordning 50 m.

Typ 3

Vid interferometri mäter man ekot av modulationen av den utsända lasersignalen. Fassetillnaden mellan det kontinuerligt utsända och eko-signalen innehåller informationen om distansen. Risken vid denna tekniken är att om laser är i nästa modulationsperiod kan retursignalen av det första signalen inte entydigs utvärderas. Det innebär att laser frekvensen måste anpassas till den att mätande distansen. En stor fördel av denna tekniken är dess pris, hög noggrannhet och relativ enkla systemkomponenter.

Tabell 4: Sammanfattning av optiska distansmätmetoder. [19]

Table 4: Summary of different measurement technologies. [19]

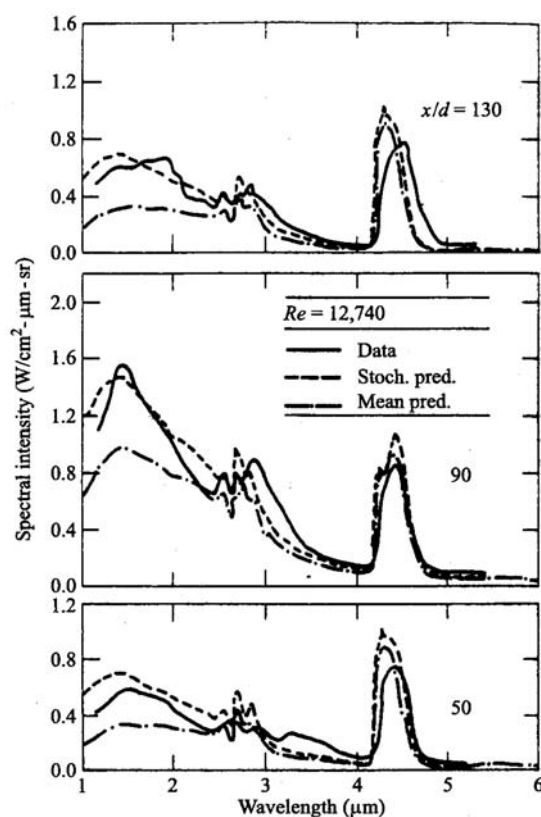
	Triangulering	Time of Flight	Interferometri
Räckvidd	till max. 10 m	till 50 m	till 200 m
Noggrannhet, beroende på tid och effekt	ca. 0,1 % på nära håll	i mm-område och finare	i mm-område
Fördelar	Enkel och prisvärd konstruktion	Lång räckvidd Hög noggrannhet	Enkel och prisvärd konstruktion, hög noggrannhet

4.1.5 Strålning från flammor

Placeringen av mätinstrumentet i pannan är betydande för dess funktion. Instrument placerade så att de måste mäta genom flammor kräver helt andra egenskaper än om det går att placera mätinstrumentet där det når direkt fram till bränslebädden. En viktig parameter vid bränslebäddsreglering är att kunna mäta bränslenivån redan vid bränsleinmatningen. Placerar instrumentet direkt ovanför bränsleinmatningen behöver inte instrumentet kunna mäta genom eld. En sådan placering kan dock vara svår att hitta i befintliga pannor utan ingrepp i pannan. Alltså är det en fördel om instrumentet kan sitta där det kan behöva mäta genom flammor.

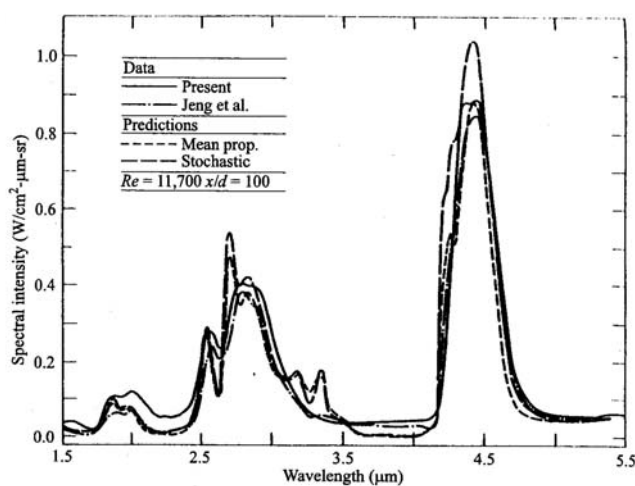
Det finns två källor till värmestrålning från en flamma; den molekylära strålningen som främst härstammar från CO₂ och H₂O, samt svartkroppsstrålning från flamsot. Den molekylära strålningen är koncentrerad till det infraröda spektrat med två intensitetstoppar vid 2,5-3 µm samt vid 4-5 µm. Närvaron av flamsot ger dessutom förhöjd strålningsintensitet vid kortare våglängder, med en topp vid 1,5 µm. I Figur 13

åskådliggörs våglängdsskillnaden mellan metan, som är ett bränsle med liten flamsotproduktion, och i Figur 12 etylen som ger rikligt med flamsot. [20]



Figur 12: Strålningsintensiteten från en etylen-luft flamma vid olika positioner. [20]

Figure 12: Spectral intensity from an ethylen-air flame at different positions. [20]



Figur 13: Strålningsintensiteten från en metan-luft flamma vid olika positioner. [20]

Figure 13: Spectral intensity from a methane-air flame at different positions. [20]

4.2 Pannmiljöns påverkan på laserstrålen

Den mest störande faktorn i pannmiljön för användning av laser är stoft- och partikelmängden. Dämpningen av laserstrålen ökar med partikel- och stoftkoncentrationen p.g.a. spridningen. Som nämnts tidigare ökar både Rayleighspridningen och Miespridningen med frekvensen på laserstrålen. Vid val av lasersensor borde därför en laser med stor våglängd, t.ex. en laser i det nära infraröda området, vara att föredra framför en laser med kort våglängd. Hög effekt på laserstrålen vid hög halt av stoft och partiklar ökar chansen att en retursignalen detekteras av lasern. Valet av pulsad resp. kontinuerlig laser har i sig ingen inverkan på resultat i stoftrika miljöer, men en pulsad laser öppnar för metoder i signalbehandlingen att begränsa störningssignaler som uppkommer från stoft. Med hänsyn till den stoftrika miljön borde alltså en pulsad laser med stor våglängd och hög effekt vara mest lämpad för bruk i panna.

Gassammansättningen påverkar lasern genom atomabsorption. Absorptionen beror på vilket gasspektra vi har och hur molekylstrukturen ser ut. Molekylstrukturen i sin tur beror av temperaturen. Man vet lite om hur molekylstrukturen ser ut vid de aktuella temperaturerna i en panna. Förutom absorptionen varierar brytningsindex mellan olika gaser. Generellt kan sägas att ljus i UV-området bryts av mer än ljus inom IR-området. Hög intensitet ger större förutsättningar till att strålen inte dämpas. Vid för kraftig intensitet finns risken att mättnadseffekter uppträder, dvs. att den optiska övergången blir mättad och transportmediet blir högjoniserat. Detta fenomen beror på laserns våglängd samt på transportmedium. Med våglängden 660 nm i luft inträffar detta, enligt Eckbreth [21], vid $1,5 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$. Det har gjorts undersökningar med Nd:YAG laser i ren luft som visade att risken för mättnad av optisk övergång ökar med ökad våglängd [21].

4.3 Lasersensorer i försök

Denna sektion sammanfattar kort de olika lasersensorer som användes i detta projekt.

Leuze Sensor Gruppen ODS96



<i>Tillverkare:</i>	Leuze Electronic GmbH & Co KG In der Braike 1 73277 Owen – Teck Tyskland http://www.leuze.de/
<i>Våglängd:</i>	660 nm
<i>Laserklass:</i>	2 / $\leq 1 \text{ mW}$
<i>Mätmetod:</i>	Triangulering
<i>Lasertyp:</i>	Diodlaser
<i>Mätområde:</i>	0,2-2 m, resp. 4-20 mA 0,2-5 m, resp. 4-20 mA
<i>Övrigt:</i>	2 modeller är testade; max 2 m samt max 5 m mätområde

Lase GmbH ELD P 20 HT 12 NR S



<i>Tillverkare:</i>	LASE GmbH Industrielle Lasertechnik Am Schornacker 59 46485 Wesel Tyskland http://www.lase.de
<i>Våglängd:</i>	905 nm
<i>Intensitetsklass:</i>	3a
<i>Mätmetod:</i>	TOF, <1ms
<i>Lasertyp:</i>	Diodlaser
<i>Max avstånd:</i>	20 m
<i>Övrigt:</i>	

Riegl LD90-3100HS-HT



<i>Tillverkare:</i>	Laser Measurement Systems GmbH 3580 Horn, Riedenburgstr. 48, Österrike, http://www.riegl.co.at
<i>Våglängd:</i>	≈ 900 nm
<i>Intensitetsklass:</i>	3b
<i>Mätmetod:</i>	TOF
<i>Lasertyp:</i>	Diodlaser
<i>Max avstånd:</i>	
<i>Flyt. stål max</i>	3 – 7 m
<i>1450 °C</i>	
<i>Glödande yta max</i>	2 – 10 m
<i>1200 °C</i>	
<i>Andra föremål max</i>	2 – 100 m
<i>800 °C</i>	

Övrigt:

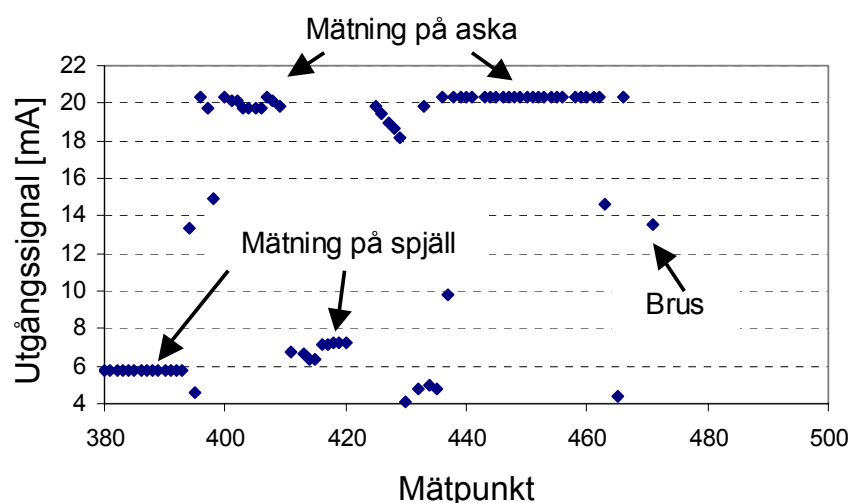
En äldre version av denna laser testades. Systemet LD90-3100HS-HT är en modern version av den testade.

Systemet LD90-3200HiP är tillämpad för mätningar i stoftrika miljöer, t.ex. silos.

4.4 Resultat av laserförsök med ODS 96 och Lase ELD P

Innan försök genomfördes i Gärsdaverket gjordes ett test med Lase ELD P mot en bränslebädd som ej var under förbränning. Försöket genomfördes för att undersöka om laserstrålen klarade att mäta en porös och ojämn bränslebädd utan de störande faktorerna som existerar i en panna. Bränslet i detta fall var 70% flis och 30% spån. Lase ELD P klarade detta med mycket bra resultat inom hela sitt mätintervall.

I pannan har både ODS 96 och Lase ELD P visat sig kunna ge resultat när pannatmosfären varit relativt stoft- och partikelfri. Vid lite till medelmycket stoft har dock ingen retursignal kunnat detekteras.



2003-03-18

Figur 14: Mätning med ODS 96.

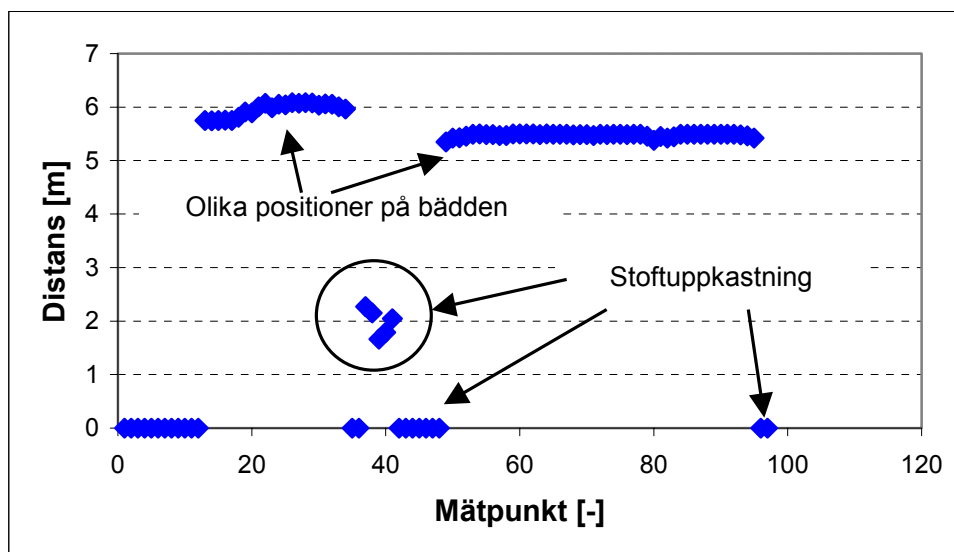
Figure 14: Measurement result with ODS 96.

Under mätningarna med ODS 96 riktades markören mot bädd, lågor och stoft för att se hur mätresultatet skulle se ut. Mestadels av försökstiden var pannatmosfären stoftrik. De få tillfällena då det var lite stoft, dvs. man såg inga partiklar alls, kunde man uppfatta den röda punkten från laserstrålen mot slaggnedfallet och i askan nära i bädden. Vid hög stofthalt gick det inte att uppfatta den röda punkten och det blev svårt att avgöra var i pannan lasern var riktad. En mätpunkt i Figur 14 motsvarar 1 sekund.

I Bilaga 1 visas resultaten från mätningar med ODS 96. Vid mycket stoft detekterades ingen retursignal, vilket var under den största delen av tiden. Detta visar sig som ett sträck med mätpunkter vid ca 0,2 m i diagrammen. Då laserstrålen riktades mot eld erhöles antingen ingen retursignal alls, eller en retursignal liknande ett brus, med helt stokastiska värden utan relevans. Vid låg stofthalt klarade ODS 96 att mäta distansen till slaggnedfallet.

Bilaga 2 visar den av Lase ELD P uppmätta distansen. Vid de tillfällen då Lase ELD P inte fick någon retursignal, visades resultatet "No echo!". I de plottade diagrammen visas dessa punkter som 0 meter. Vid Lase ELD P-mätningarna se Bilaga 2 kan konstateras att vid de tillfällen lasern inte svarade med "No echo", uppmätte instrumentet ofta en distans om ca 1-2 m, vilket är kortare än väntat. I ett fåtal fall lyckades Lase ELD P mäta en trovärdig distans till bränslebädden.

Figur 15 visar en mätsekvens med kommentarer till mätvärdena. Mätsekvensen i figuren gav ovanligt bra resultat, eftersom stofthalten var generellt lågt.



Figur 15: Mätning med Lase ELD P instrument.

Figure 15: Measurement result with Lase ELD P system.

Försök genomfördes vid två tillfällen i pannan på Gärstadverket. När mätningarna under det första tillfället visade att sensorerna inte kunde detektera retursignalen på ett tillförlitligt sätt, ersattes pannans befintliga fönsterglas med ett kvartsglas. Kvartsglaset har större förutsättningar att transmitta laserstrålen, då ytan är bättre slipad och det finns färre luftbubblor i glaset. Förhoppningen var att glasbytet skulle räcka för att erhålla en tydligare retursignal. Det andra mättillfället visade dock ingen förbättrad signalkvalitet från något av instrumenten.

Resultaten från Lase-ELD P och ODS 96-mätningarna har sammanfattats i Tabell 5.

Tabell 5: Resultat för ODS 96 och Lase ELD P vid olika pannförhållanden

Table 5: Summary of ODS 96 and Laser ELD P measurement at different drift conditions.

Mätobjekt/störande faktor	Detekterad signal	
	ODS 96 (triangulering, klass 2, 600 nm)	Lase (TOF, klass 3a, 905 nm)
Bränslebädd	Resultat, vid lite eller inget synbart stoft	Resultat vid inget synbart stoft
Eld	Ingen retursignal	Ingen retursignal
Lite stoft	Skiftande, ibland retursignal	Retursignal, men oftast för kort uppmätt avstånd
Mycket stoft	Ingen retursignal	Ingen retursignal

Det samlade intrycket från mätningarna med ODS 96 och Lase ELD P var att ingen av dem skulle kunna fungera i sina nuvarande konstruktioner. Lase ELD P visade ett något bättre resultat vad gäller detektion av retursignal, vilket delvis kan förklaras vid

jämförelse av egenskaperna hos de båda sensorerna. Lase ELD P tillhör en högre klass, d.v.s. arbetar med högre intensitet, samt använder sig av en längre våglängd, vilket innebär att Lase ELD P klarar bättre av att mäta genom en stoftrika atmosfär än vad ODS 96 gör.

4.5 Resultat av laserförsök med Riegl

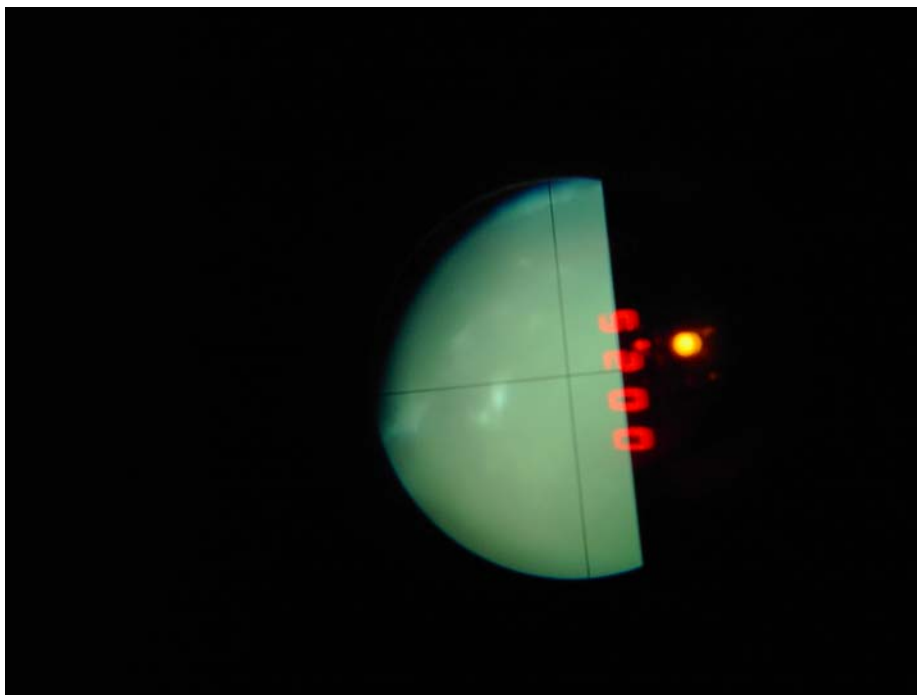
Denna laser, Riegl LR90, är från mitten av 80-talet. Lasern är avsedd för lantmäteri och husväggar på ca 400 m har tidigare mätts med denna laser med 0.1 m upplösning. För att enskilda grässtrån inte skall störa mätvärdet på dessa avstånd, så har lasern en robustare detektion även om den inte har lika god upplösning som modernare lasrar. En annan positiv egenskap är god separation mellan utgående och ingående optik. På själva lasern sitter en kamera för att positionera lasern.

Lasern kan ej anslutas till en PC för datavisualisering och lagring. Utvärdering av mätdata kan därför endast göras genom att laserns ocular fotograferas och sedan utvärderas.

Figur 16, Figur 17 och Figur 18 visar bilder från försöken som genomfördes i Panna 2, Gärstadverket. I figurerna syns ett hårkors, lågorna och avståndet i digital form. På dessa bilder har max tele zoom använts. Siffrorna är tyvärr ofokuserade. Vid mätningen var det kraftig eld med svårigheter att göra en säker utvärdering p.g.a. fuktigt bränsle. Vid några tillfällen fylldes pannan också av ett ogenomskinligt moln av sotpartiklar. Nedan redovisas två fall.

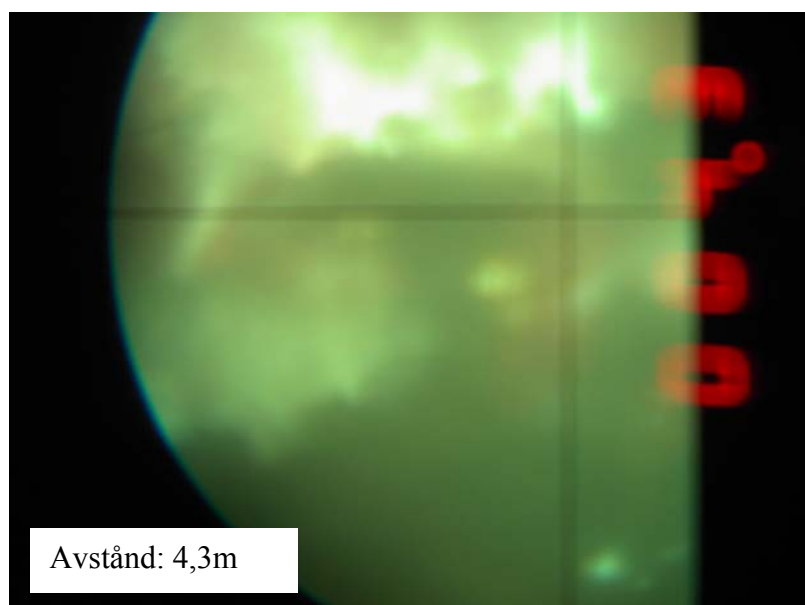
Eftersom det saknades referensobjekt på kända positioner gjordes repetitiva mätningar för att kontrollera att lasern gav rimliga mätningar. Genom att mäta på väggen ovan bädden testades rimligheten i mätningarna genom att höja och sänka lasern. Mätt avstånd var stabilt då lasern höjdes och sänktes. Detta visar att partiklar ovan bädden och allmän termiskinstrålning ej påverkar mätningarna nämnvärt.

En mätning mot en större ansamling av bränsle / aska på bädden kunde genomföras, vilket gav möjlighet att mäta avståndet genom lågorna. De uppmätta avstånden fram till bränsleansamlingen var repeterbara och rimliga. Mängden flammor var dock svårt att bedöma, se Figur 16, Figur 17 och Figur 18.



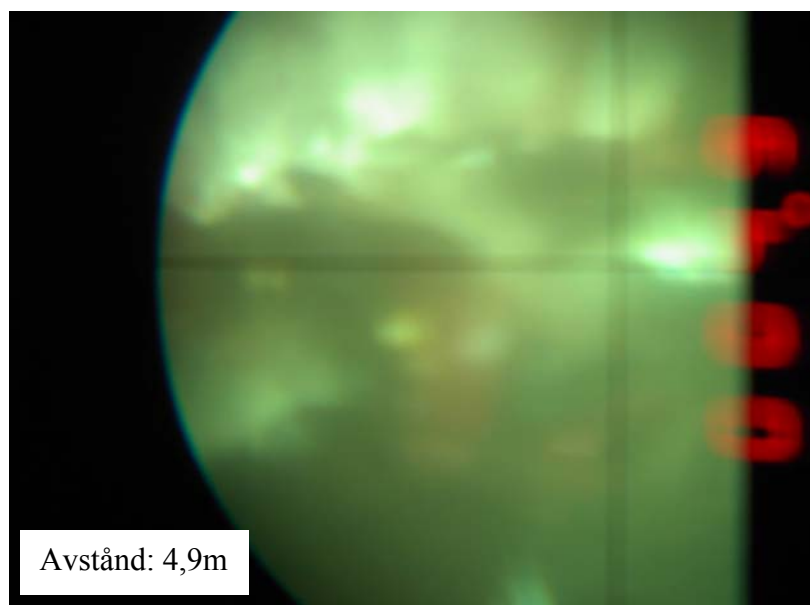
Figur 16: Mätlaserns ocular fotograferat med max vidvinkel, hårkors och mätavståndet blir skarpa medan elden blir dåligt upplöst.

Figure 16: Ocular of the laser at max wide angle, gridlock and distance value is in focus while the flames are not well resolved.



Figur 17: Foto med kameran på max telezoom, elden tydligare men avståndsvärdet blir oskarpt

Figure 17: Photo of the ocular at max telezoom, the flames become clearer while the distance value is out of focus.



Figur 18: Repetition av mätning visad i Figur 17, lasern har riktning har förändrats minimalt.

Figure 18: Repetitive measurement as presented in Figure 17, laser aimed at slightly different position.

Experimenten med RIEGL lasern hade problem att mäta genom flammor. Dock, gav lasern rimliga mätningar på glödande stoff och svagare flammor, vilket ger hopp om att en modern laser fabrikstrimmad att tåla infallande strålning, eventuellt även försedd med ytterligare filter (t ex RIEGL LD90-3100HS-HT) kan klara att mäta upp en profil på bädden. Man får dock räkna med vissa mätbortfall vid extrema flammor och dammoln.

5 Ultraljud

5.1 Allmänt om ultraljud

Ljud och ultraljud är mekaniska vågor (=tryckvågor) med frekvenser ovanför människans hörbara område. Enligt DIN är detta vid frekvenser högre än 16 kHz, allmänt anses dock 20 kHz som gräns mellan ljud och ultraljud. Den övre gränsen ligger vid 1 GHz. Frekvenser högre än 1 GHz kallas för hyperljud. Utbredning av ljudvågor kan delvis beskrivas i analogi med ljusvågor, t.ex. vid en frekvens av 500 MHz är våglängden ungefär 0,6 μm som motsvarar grönt ljus.

Mätprincipen beror på att ljudimpedansen, vågmotståndet, ändrar sig vid gränsskiktet mellan två faser eller materialen. Det betyder att ett eko reflekteras, vilket sedan kan mätas i en detektor. Ur tidsskillnaden kan sträckan räknas fram om ljudhastigheten är känd. Vanligaste tekniska användningen av ultraljud inkluderar:

- sonar applikation: djupmätning i havet / detektering av undervattensobjekt
- detektering av materialfel
- ultraljudssvets i elektroniska kretsar
- diagnostik och behandling av sjukdomar

Ultraljudets hastighet är beroende av transportmediumets fysikaliska egenskaper. Hastigheten är också beroende av om vågen är transverserande eller longitudinell. För exempelvis stål vid 20°C har en longitudinell våg hastigheten 5900-6000 m/s, medan en transverserande våg 3200 m/s. I rena vätskor uppträder endast longitudinella vågor förutom vid gränsen till en annan fas, t.ex. vågor på havsytan. Hastigheten i vätskor är temperaturberoende och minskar med ökad temperatur, förutom i vatten där hastigheten ökar upp till 70°C där den når sitt maximum för att sedan minska. Hastigheten i vätskor är så gott som oberoende av trycket. För saltlösningar, colloidala lösningar, syror etc. beror ultraljudets utbredning även på partikelmängd och storlek, jonkoncentration osv.

För gaser som följer tillståndslagen för en ideal gas kan våghastigheten c beräknas med:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta_{\text{ad}} \rho}} = \sqrt{\kappa \frac{1}{\beta_{\text{is}} \rho}} \quad [\text{m/s}] \text{ efter [22]}$$

$$= \sqrt{\kappa R T}$$

där

$$\kappa = \frac{\beta_{\text{is}}}{\beta_{\text{ad}}} = \frac{c_p}{c_v}$$

är Poisson's konstant,

ρ

gasdensiteten,

$\beta_{\text{ad}}, \beta_{\text{is}}$

den adiabatiska och den isentropiska

kompressionskoefficienten (kompressibilitet),

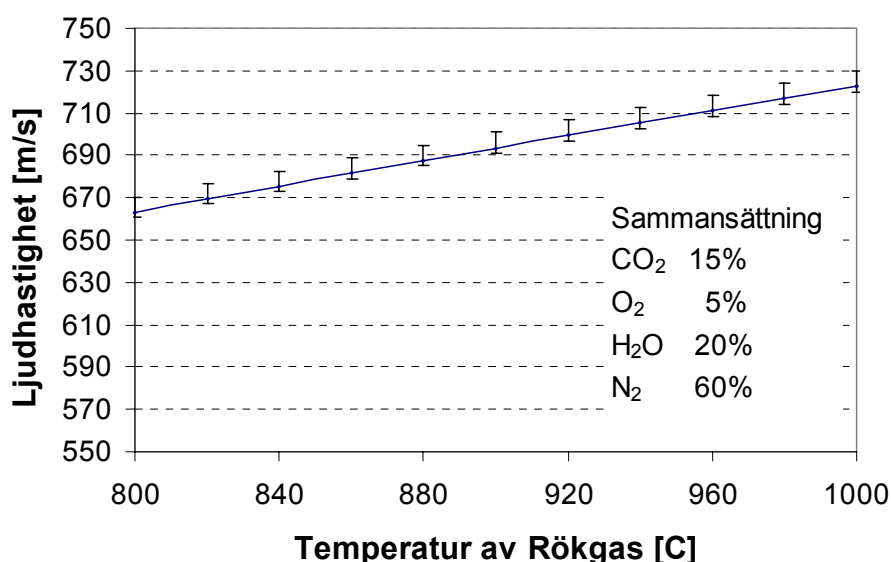
R

spec. gaskonstant och

T

är temperaturen.

Ekvationen visar hur gassammansättning och temperatur påverkar ljudhastigheten. Förhållanden i en panna kan approximeras som en blandning av gaser som följer den tillståndslagen för ideala gaser. Figur 19 visar ljudhastigheten som funktion av temperatur. Här antogs att förhållanden mellan den specifika värmen är konstant. Felstaplar i Figur 19 är beräknad för varierande gassammansättningar, den positiva felstapel är beräknad för en gas som består av: 30% CO₂; 5% O₂, 50% H₂O och 15% N₂. Den negativa för en gas som består av: 10% CO₂; 5% O₂, 10% H₂O och 75% N₂. Tabell 6 visar siffervärden för olika gaser.



Figur 19: Ljudhastigheten som funktion av temperaturen enligt tillståndslagen för ideala gaser.

Figure 19: Velocity of sound as a function of temperature for a gas following the equation of state for an ideal gas.

Figur 19 visar att ljudhastigheten mellan 800°C och 1000°C ökar med 9%. I verkliga gaser finns det dock en rad parametrar förutom temperaturen som påverkar ljudhastigheten. I analogin till ljus finns det även akustisk dispersion som påverkas av inre friktion, adsorptionsfenomen och partiklar i gasblandningen.

Enligt [22] kan vid små temperaturvariationer kan ultraljudshastigheten även beräknas med

$$c = c_0 + \gamma \Theta \text{ [m/s]}$$

där c_0 är utbredningshastigheten vid 0°C, γ absoluta temperaturkoefficienten och Θ är temperaturdifferensen mellan den aktuella temperaturen (°C) och 0°C. För exempelvis luft, 50°C, blir då ultraljudshastigheten 360 m/s, dvs. en ökning med 30 m/s jmf med en temperatur på 0°.

I gaser beror ultraljudets hastighet inte bara på temperaturen och på fuktigheten. Vid 50% fuktighet kan hastighetsökningen approximeras till 1% och vid 100% fukt kan ökningen uppskattas till 2%.

Ljudhastigheten påverkas även av partiklar och dess storleksfördelning and koncentration. Det är dock mycket svårt att uppskatta denna påverkan. Även gassammansättningen påverkar ljudhastigheten i hög grad. Tabell 6 visar ljudhastigheten för några gaser vid en temperatur av 20°C.

Tabell 6: Ljudhastigheten för olika gaser vid 20 °C och $p=1013$ mbar.

Table 6: Velocity of sound in different gases at 20 °C and $p=1013$ mbar.

Gas	Ljudhastighet (m/s)
Ammoniak, NH ₃	429,9
Argon, Ar	319,1
Koldioxid, CO ₂	268,3
Kolmonoxid, CO	349,2
Etan, C ₂ H ₆	327,4
Helium, He	994,5
Metan, CH ₄	445,5
Kväve, N ₂	349,1
Kvävemonoxid, NO	346
Syre, O ₂	328,6
Propan, C ₃ H ₈	246,5

5.2 Ljud absorption

Ljud absorberas vid passage genom en gas. Gasens sammansättning påverkar i hög grad absorptionen av ljudintensiteten. I pannmiljön tillkommer ytterligare dämpning av ljudet pga. den höga halten av fasta partiklar.

En noggrann fysikalisk beskrivning av ljudabsorption i poly-atomära gaser är mycket komplex och behöver inte beskrivas här i detalj [23]. Allmänt kan man dock säga att ljudintensitet I minskar exponentiellt med distansen x från ljudkälla,

$$I = I_0 e^{-2\alpha x}$$

där:

I_0 intensitet vid ljudkälla

α absorptionskoefficient som är en funktion av materialegenskaper, frekvensen av ultraljudet, temperatur, tryck

I analogi med dämpning i gaser kan ljudabsorption i en vätska betraktas, vilken är enklare att beskriva matematisk. Absorptionskoefficient finns i litteraturen i datatabell [24]. Till exempel, för vatten finns följande tabellvärden:

$$\alpha_{35 \text{ kHz}} = 3.1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha_{1000 \text{ kHz}} = 25.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

Med de värden kan ovanstående ekvationen integreras, för att räkna ut sträckan x_{halv} där ljudintensiteten har halverats, dvs. $I/I_0 = 0.5$

$$35 \text{ kHz: } x_{\text{halv}} = 11180 \text{ m}$$

$$1000 \text{ kHz: } x_{\text{halv}} = 13.7 \text{ m}$$

Detta exempel visar hur frekvensen påverkar absorptionen av ljudvågor i en vätska. Man kan dock dra liknande slutsatser för en gas, särskilt för en gas med hög stofthalt, nämligen att ultraljudsfrekvensen borde inte vara för hög för avståndsmätningar.

5.3 Önskade egenskaper hos ultraljud i panna

Generellt kan man säga att ju längre avståndet blir som ska mätas desto högre effektkrav ställs på mätsystemet. Dessutom krävs det enligt Leuze Sensor Gruppen en retursignal med en styrka på ca 30 dB [26]. Låga ultraljudsfrekvenser (5-15 kHz) går igenom en partikelrik miljö bättre än ett högfrekvent ultraljud. Högfrekventa ultraljud reflekteras mot partiklar. Ultraljud används redan som nivåmätare i silos med flygaska, sandsilo, kalk mm [27]. Enligt kontakt med olika företag, Leuze Sensor Gruppen och tyska Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bereich Ultraschall, är det den ökade effekten, som är en konsekvens av minskad frekvens, som leder till en förbättrad retursignal.

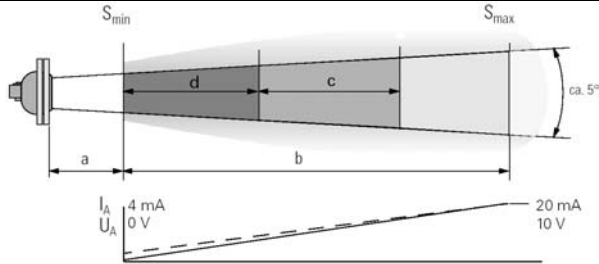
Samtliga företagskontakter har bekräftat att lågfrekventa ultraljudssensorer är bättre lämpade i stofrika miljöer. Inom projektet var det dock inte möjligt att ta fram en passande sensor med låg frekvens för försök i Gärstadverket. Företaget Wesmar har visserligen en ultraljudsgivare på 5 kHz i sitt sortiment, systemet är dock 1,5 m lång och är pga. sin storlek inte användbart för mätningar i Gärstadverket.

5.4 Ultraljudssensor i försök i panna

Ultraljudsgivaren SONAR BERO III har använts i försöken i Gärstadverket. I följande beskrivs mätsystemet kort. Informationen är tagen från instrumentets tekniska specifikation. Systemet är en kontaktlös fungerande givare för DC 24 V, som fastställer avstånd på grundval av ekotiden. Den reagerar när ett ljudreflekterande föremål kommer in i ljudkägla från godtyckligt håll. De föremål som avkänns kan vara fasta, flytande eller pulverformiga. Apparaten är temperaturkompenserande.

Tabell 7: Beskrivning av SONAR BERO ultraljudsgivare

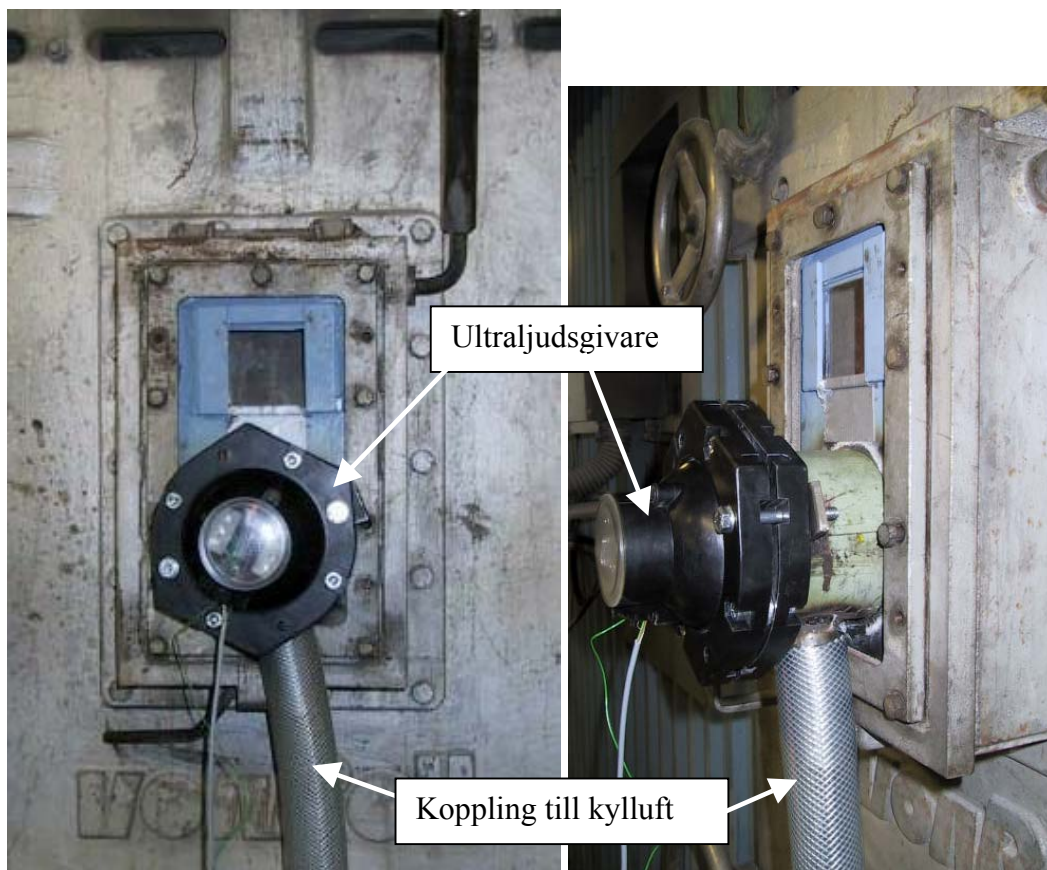
Table 7: Description of SONAR BERO ultrasound system.

Vikt	1800 g inkl. fäste	Sensormembran 
Yttre dimension	160 x 112 mm	
Ultraljudsfrekvens	60 kHz	
Upplösning	3 mm	
Mätområde	80 – 1000 cm	
Reflektionsyta för max. mätavstånd	100 x 100 mm ²	
Noggrannhet	± 1.5%	
Öppningsvinkel	5°	
		a: ej användbart område b: arbetsområde c: inställbart arbetsområde d: spärrområdet S _{min/max} : minsta / största mätbart avstånd

I försöket med mätningar i pannen kommer sensorn att beräkna avståndet till mätobjektet med den temperatur som omger själva sensorn, dvs. med temperaturen i det kylda området. Eftersom pannen har en annan temperatur kommer längdmätningen ge ett fel, Δl . Det är svårt att beräkna felet eftersom gas och temperatursammansättningen i pannen är komplex. Det enklaste sättet att uppskatta felet är att kalibrera mot ett känt avstånd i pannen och räkna ut skillnaden, Δl . Felet kan sedan antas konstant över tiden [25].

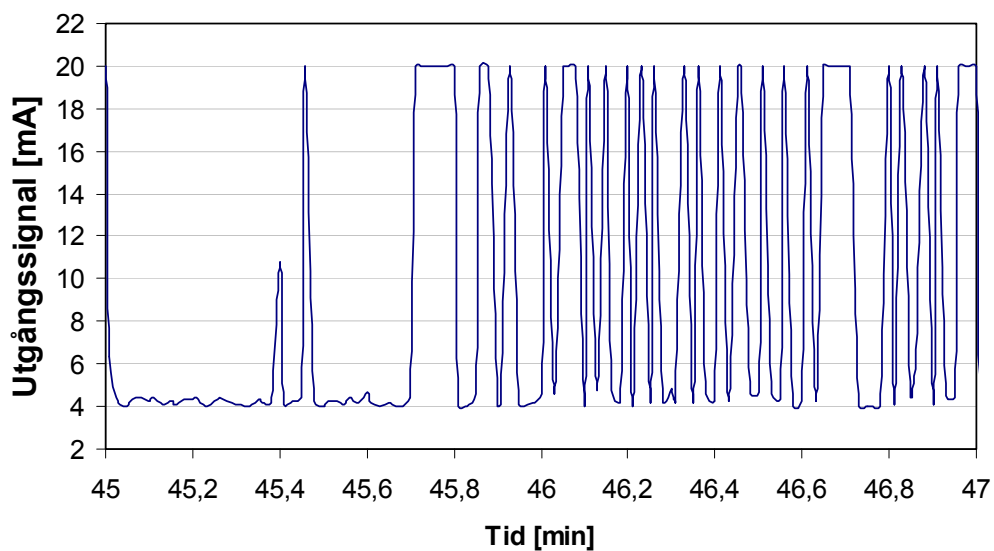
5.5 Resultat av ultraljudförsök

Vid försöket med ultraljud monterades sensorn fast i manluckan, eftersom ultraljudet måste sitta direkt ansluten till pannen. Ultraljudsensorn kylde m.h.a. en fläkt som anslöts till sensorns inneslutning, se Figur 20. Det fanns en påfallande risk att ljudet från kyl Luften skulle kunna störa ultraljudvågorna. Därför genomfördes en provmätning utanför pannen, först utan, sedan med kyl Luften påslagen. Ultraljudet uppmätte samma avstånd i båda fallen och det konstaterades att kyl Luften inte var störande. Därefter kunde mätningarna i pannen påbörjas.



Figur 20: Ultraljudsmätare monterat på panna.

Figure 20: View of mounted ultrasonic measurement system.

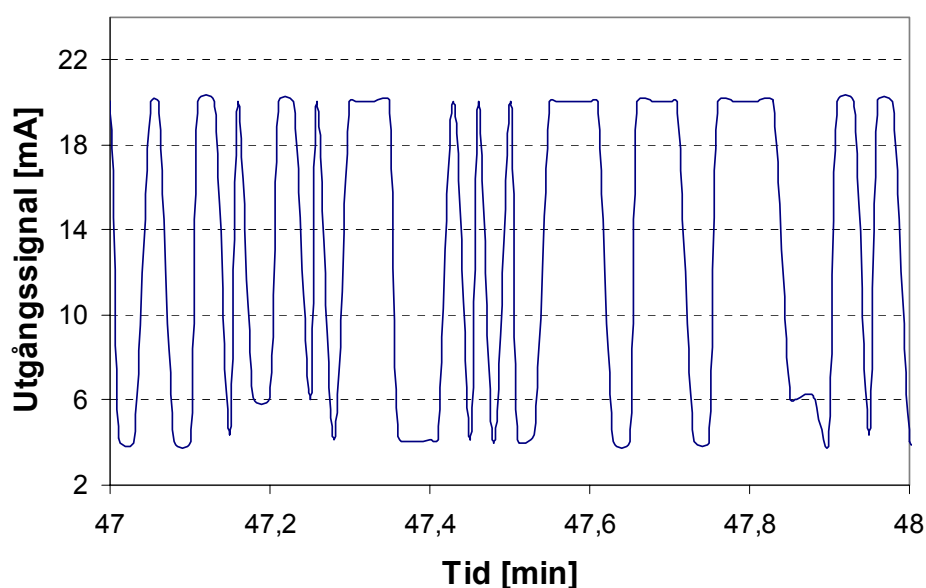


Figur 21: Typiskt mätresultat med SONAR-BERO

Figure 21: Typical measurement result using the SONAR-BERO system

I Figur 21 visas en del av mätresultatet med ultraljud SONAR-BERO. Ultraljudet är riktat rakt in i förbränningsrummet. P.g.a. ultraljudets mätområde (0.8-10 m, motsvarar 4-20 mA i Figur 21) understiger signalen aldrig 0.8 m eller överstiger 10 m. I området från 45.0-45.7 min bedömdes okulärt pannatmosfären innehålla mycket stoft. Mellan 45.7-46.5 min ansågs stofthalten som liten och mellan 46.5-47.0 min kunde inga partiklar ses. Under perioden med påfallande mycket stoft mätte SONAR-BERO endast 0.8 m eller strax över. Vid lite mindre stoft i pannatmosfären fluktuerade mätsignalen mellan 0.8 och 10 m, se Figur 21.

När instrumentet riktas rakt in i förbränningsrummet är avståndet mellan instrumentet och bränslebädden ca 4 m. Ändå uppmätte SONAR-BERO ända upp till 10 m. De märkliga resultaten visades upp för leverantören, Leuze Sensor Gruppen, som bedömde att resultatet kan klassas som brus, dvs värden utan relevans.



Figur 22: Typisk mätresultat med SONAR-BERO

Figure 22: Typical measurement result using the SONAR-BERO

Under följande minut fortsätter kurvan att likna ett brus, se Figur 22. Då och då uppmätte instrumentet 2 m, vilket skulle kunna tyda på att signalen nått fram till och reflekterats av bädden för att sedan detekterats av sensorn. Det uppmätta avståndet är visserligen för kort, men det kan förklaras av att ljudhastigheten är markant högre beroende på pannans temperatur, se Figur 19: Ljudhastigheten som funktion av temperaturen enligt tillståndslagen för ideala gaser.

Resultaten sammanfattas i Tabell 8.

Tabell 8: Resultat av ultraljudsmätningar med SONAR-BERO.

Table 8: Summary of results with the SONAR-BERO system.

Synlig stoftmängd	Uppmätt avstånd
Mycket stoft	Ca 0.8-1 m
Lite stoft	Brus (fluktuerande mellan ca 0.8 och 10 m)
Inget synligt stoft	Brus (fluktuerande mellan ca 0.8 och 10 m) OCH ibland 2 m

Att resultatet från SONAR-BERO i en till synes stoftrik miljö inte är ett brus, utan ett värde, skulle kunna förklaras med att ultraljudsvågorna reflekteras mot stoftet. Varför resultatet i en till synes stoftfri miljö blev ett brus är däremot svårare att förklara. Antingen har ingen signal detekterats överhuvudtaget, eller så detekterades en signal delvis, men inte tillräckligt ofta för att ge utslag. Signalbehandlingen i sensorn, vilken är okänd för användaren, spelar antagligen en stor roll här på mätresultatet.

När ingen retursignal detekteras kan det bero på flera orsaker; akustisk dispersion, ljudabsorption i gasen eller eventuella andra ljudstörningar. Den exakta anledningen är svår att bestämma.

6 Radar

6.1 Allmänt radar

Radar står för radio, detecting and ranging. Radiovågor är elektromagnetiska vågor med våglängder mellan 10^{-5} - 10^4 m.

Radar är snarlikt mikrovågor, dvs. de penetrerar material som inte är konduktiva. Exempel på icke-konduktiva material är torrt plast, papper, organiskt material, medan konduktiva material är t.ex. metall och blött material. I en avfallspanna torkar bädden efter hand och om radarvågor skulle användas som mätmetod skulle de antagligen reflekteras främst mot metallinnehållet i bädden. Övrigt material skulle sannolikt penetreras av vågorna, som sedan skulle reflekteras mot roststavarna.

Efter att kontakt tagits med både FOI och Wesmar har båda företagen avböjt att delta med instrument i försök av ovan nämnda skäl.

Radar skulle eventuellt kunna fungera vid inmatningen där bränslet fortfarande är fuktigt, förutsatt att bränslet är ett biobränsle med hög fukthalt. Det skulle dock bli opålitliga resultat, eftersom det är svårt att garantera en konstant fukthalt i biobränsle.

Radar fungerar på material med dielektricitetskonstant, ϵ_r , ned till 1,6-1,7. I Tabell 9 ges några exempel dielektricitetskonstanten för några material.

Tabell 9: Dielektricitetskonstanter för några material.

Table 9: Dielectric constant for different materials.

Material	Dielektricitetskonstant [-]
Vatten	80
Olja	2
Flytande gaser	1,5
Plast	1,2-1,3

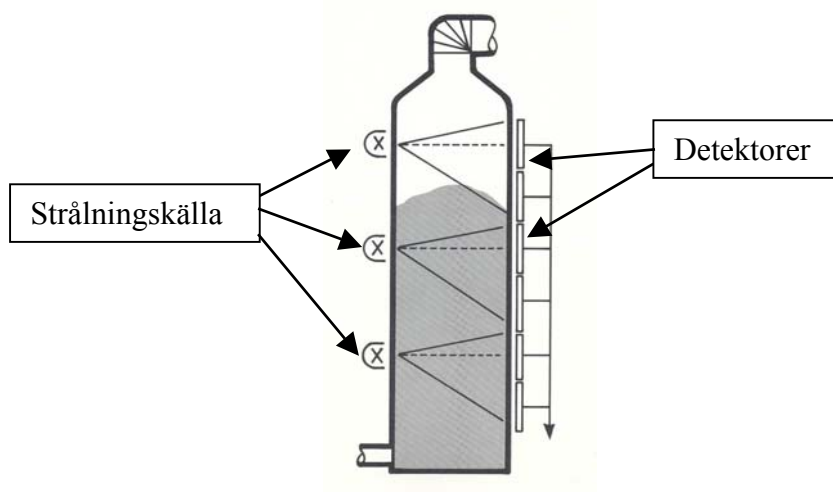
Metaller reflekterar radar nästan lika bra som vatten. Likaså ger cement, malda bergarter och kol en bra retursignal.

Torrt flis reflekterar inte radar. Askor och ett fuktigt bränsle däremot skulle kunna reflektera radarvågorna. Vilken fukthalt som krävs i bränslet för reflektion är okänt. [27]

7 Gammamätare

7.1 Allmänt

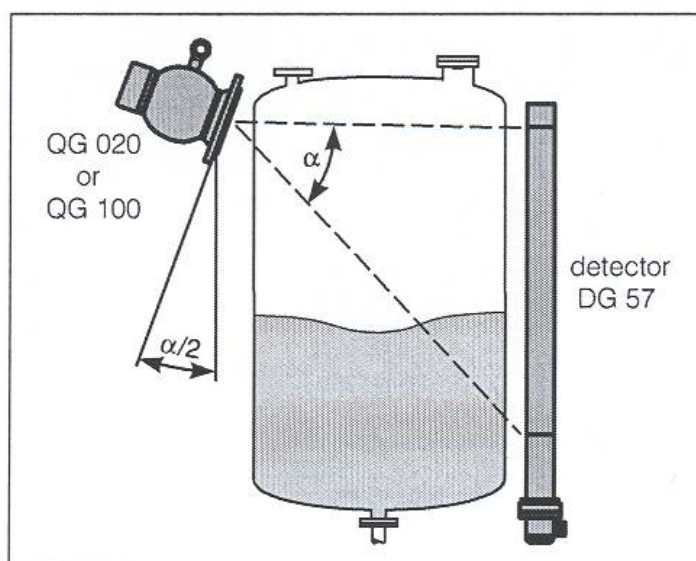
De flesta instrument som kan användas för att övervaka bädden i en rostpanna måste vara installerade inuti pannan. Mätning med hjälp av gammavakter kan däremot ske genom att placera mätinstrumentet utanför pannan. Principen går ut på att en radioaktiv källa installeras utanför ena pannväggen. Den radioaktiva källan avger gammastrålning som fångas upp av detektor som placeras på andra sidan pannan. Alternativt kan strålningskällan placeras ovanför panntaget och detektorn under bränslebädden, vilket är kan tänkas vara lämpligt då nivån av en bränslebädd ska övervakas. När gammastrålningen passerar genom bränslebädden absorberas den av bränslet och mängden utsänd strålning reduceras. Det är därmed möjligt att övervaka förändringar i bränslebäddens tjocklek.



Figur 23: Mätning med gammamätare där strålningskällan och detektorn är placerad på varsin sida om reaktorn [28].

Figure 23: Measurement with gamma-radiation system with the emitter and detector being placed on opposite sides of the furnace [28].

Den radioaktiva strålningskällan består av en gammakälla (Co^{60} eller Cs^{137}) som är inkapslad i ett hölje av bly. Strålning tillåts endast passera ut genom en öppning i blyväggen. Vinkeln för spridningen av strålarna kan variera mellan olika typer av utrustningar men vanligast är en spridningsvinkel på 5, 20 eller 40°.



Figur 24 Exempel på gammainstrument från Endress + Hauser för mätningar i en reaktor. Spridningsvinkeln α kan varieras mellan 5, 20 och 40° [29].

Figure 24: Example of gamma radiation measurement system from Endress Hauser, range angle α can be 5, 20 or 40° [29].

Detektorn genererar pulser vid en frekvens som är proportionell mot strålningsstyrkan. Därigenom kan förändringar i bränslenivån detekteras. Detektorn är vanligtvis en scintillationsdetektor som har en hög känslighet även vid låga strålningsdoser. Det är även möjligt att använda en detektor som innehåller en GM (Geiger-Müller) mätare.



Figur 25: Strålningskälla QG 020 eller QG 100 och scintillationsdetektor DG 57 från Endress & Hauser [29].

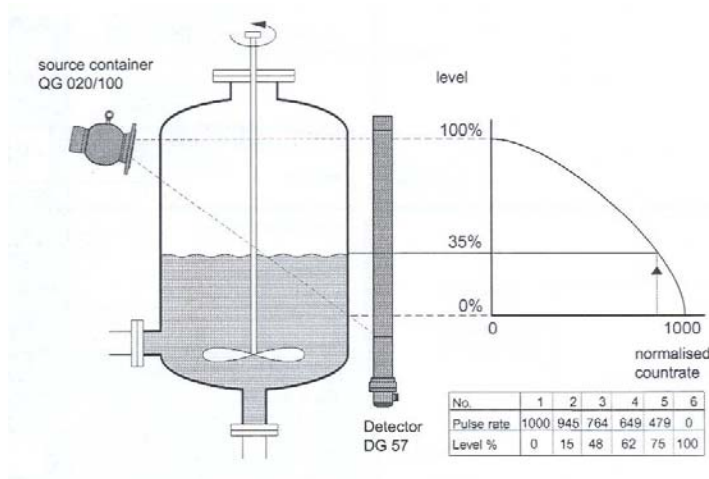
Figure 25: Radiation source QG 020 or QG 10 and scintillationsdetector DG 57 from Endress & Hauser [29].

För att kunna mäta enbart nivån i bränslebädden och ignorera pannväggar, roststavar mm. måste två parametrar definieras. Den ena är avståndet mellan strålningskällan och detektorn och den andra är massan på materialet som gammastrålarna måste penetrera

när pannan är tom. För en panna med en rörlig rost varierar tjockleken på rosten där strålarna ska passera i och med att roststavarna rör sig fram och tillbaka. Det är då lämpligt att göra mätningar enbart då roststavarna befinner sig i ett specifikt läge.

7.2 Noggrannhet vid rostövervakning

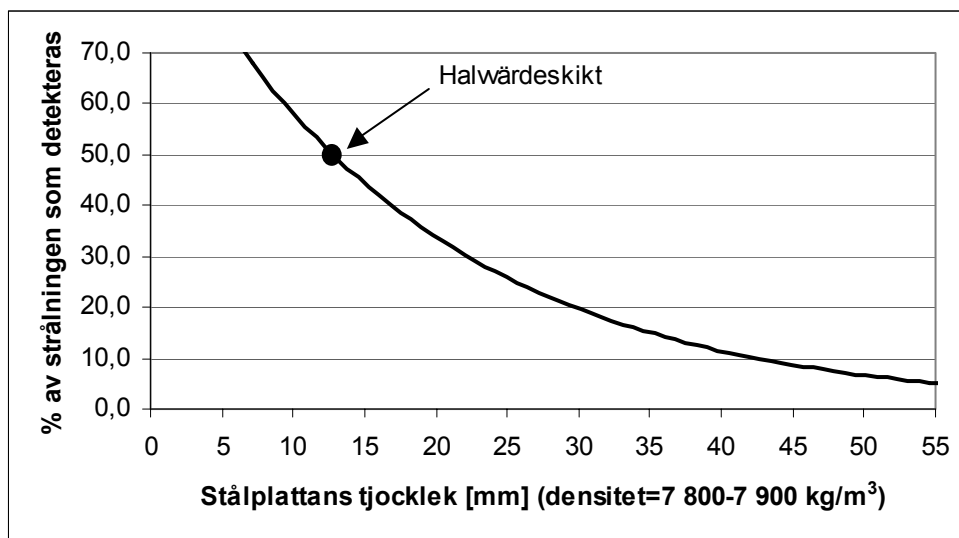
Nivåskillnader i en panna/reaktor kan med metoden i Figur 26 mätas med en noggrannhet på 1% förutsatt att nivån i pannan/reaktorn motsvarar minst ett halvvärdeskikt.



Figur 26: Nivåmätning i en reaktor. [29]

Figure 26: Level measurement in a reactor. [29]

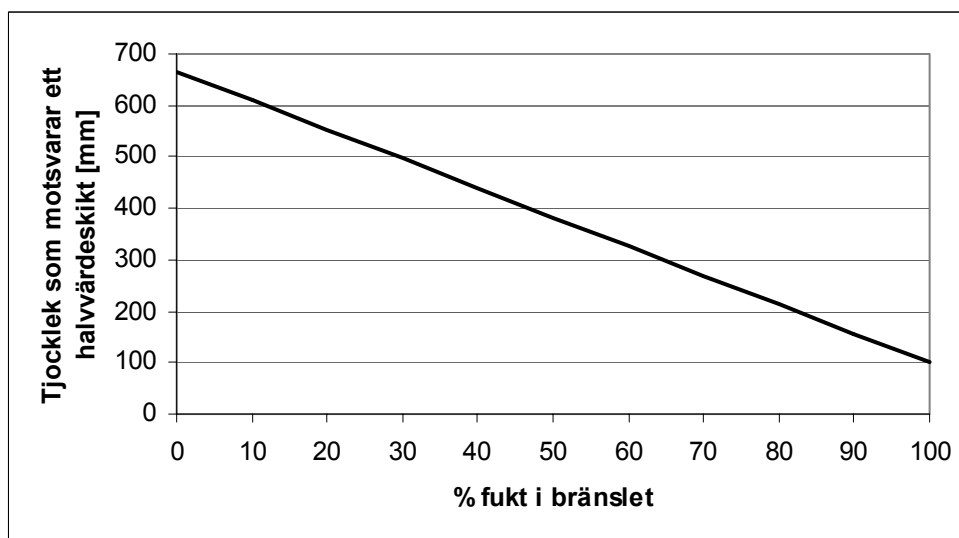
Halvvärdeskikt mäts vanligen i stål och motsvarar då en tjocklek på 12,8 mm ($\rho=7800\text{--}7900\text{ kg/m}^3$). Detta betyder att om en stålplatta som är 12,8 mm tjock placeras i en tom panna/reaktor kommer hälften av gammastrålarna från strålningskällan att nå detektorn. Dubblas stålplattans tjocklek (25,6 mm) kommer 25% av strålarna att detekteras, tredubblas stålplattans tjocklek (43,8 mm) kommer 12,5% att detekteras osv. enligt Figur 27.



Figur 27: % detekterade strålar som funktion av tjockleken på en stålpatta med densiteten 7800-7900 kg/m³.

Figure 27: % of detectable radiation as a function of thickness of a steel plate of density 7800-7900 kg/m³.

Halvvärdeskikt kan på samma sätt som för stål definieras för en viss tjocklek på en bränslebädd. Eftersom bränslets fukthalt varierar är emellertid inte densiteten konstant vilket gör att bäddtjockleken som motsvarar ett halvvärdeskikt kommer att variera. För ett träbränsle ($\rho=150 \text{ kg/m}^3 \text{ TS}$) med en fukthalt på 50% motsvaras ett halvvärdeskikt av en bäddtjocklek på 383 mm se Figur 28.

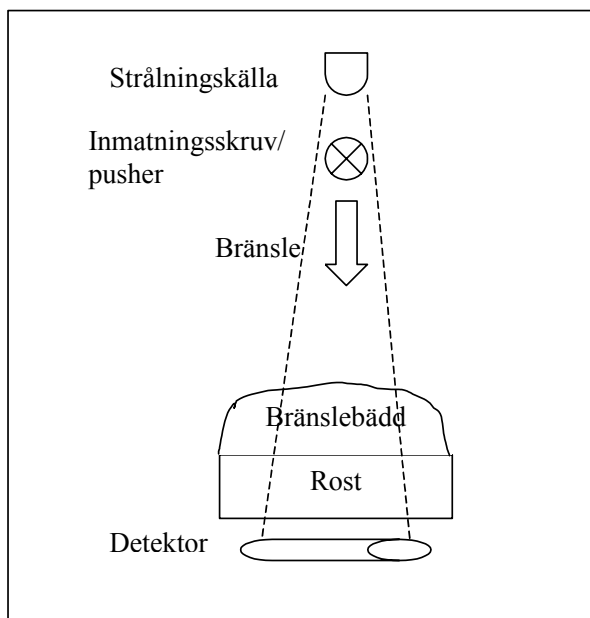


Figur 28: Tjocklek på bränslebädden som motsvarar ett halvvärdeskikt som funktion av fukthalten i bränslet ($\rho=150 \text{ kg/m}^3 \text{ TS}$).

Figure 28: Thickness of fuel bed which corresponds a half-value layer as a function of moisture in the fuel ($\rho=150 \text{ kg/m}^3 \text{ DM}$).

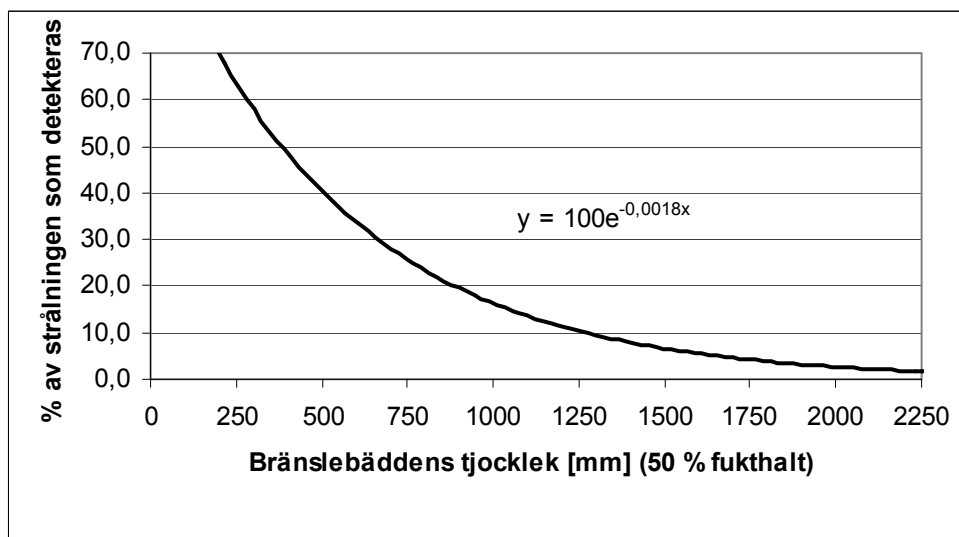
7.2.1 Mätning i vertikal riktning

För att övervaka bränslenivån i en rostpanna borde det vara lämpligare att placera strålningskällan i panntaget och detektorn under rosten så att strålningen går genom bränslebädden i vertikal riktning, se Figur 29.



Figur 29: Genomskärningsbild för övervakning i vertikal riktning av en bränslebädd.

Figure 29: Schematic of grate monitoring system in vertical measurement direction.



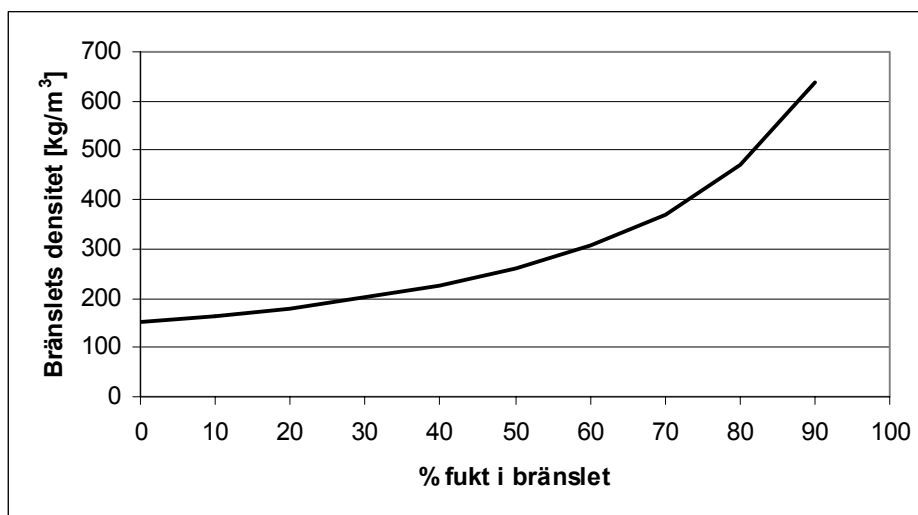
Figur 30: % av strålningen som detekteras som funktion av bränslebäddens tjocklek. Bränslet antas ha en densitet för TS på 150 kg/m^3 och en fukthalt på 50 %.

Figure 30: % of radiation which is detected as a function of fuel bed thickness, fuel is assumed to have a density of 150 kg/m^3 DM and a moisture content of 50%.

Noggrannheten för nivåmätningen då utrustningen placeras på detta sätt skiljer sig något från det tidigare beskrivna fallet (se Figur 26) med mätning tvärs över pannan/reaktorn. Förändringar i strålningsintensitet kan mätas med en noggrannhet på 1%. För en bränslebädd med en tjocklek på omkring 0,5-1 meter motsvarar denna intensitetsförändring en förändring av bäddnivån på cirka 3%, enligt Figur 30. Vid övervakning av en rostbädd borde det således vara möjligt att mäta bäddnivån med en noggrannhet på omkring 3%.

7.2.2 Inverkan av bränslets fukthalt

Som tidigare nämnts varierar densiteten för ett träbränsle med bränslets fukthalt. Om densiteten för ett torrt träbränsle är 150 kg/m^3 och bränslets fukthalt antas ligga på $50 \pm 10 \%$ blir densiteten för det fuktiga bränslet $227\text{-}306 \text{ kg/m}^3$, d.v.s. densiteten varierar från 261 kg/m^3 med +17 till -13 %, se Figur 31.



Figur 31: Träbränslets densitet som funktion av fukthalten i bränsle. Densiteten för torrt bränsle 150 kg/m^3 .

Figure 31: Density of wood fuel as a function of moisture, density for dry fuel taken as 150 kg/m^3 .

Vid rostbäddövervakning med gammamätare detekteras hur mycket strålning som passerar genom bränslebädden, vilket är analogt med mätning av bränslets densitet. Om bränslets fukthalt varierar med $50 \pm 10\%$ kommer således mätfelet för bränslebäddens nivå att bli upp till 17%, vilket borde vara inom ett acceptabelt intervall. Vid lägre fukthalter minskar även skillnaderna i densitet vid varierande fukthalter. Mätfelet minskar ytterligare om man har en jämn fukthalt i bränslet alternativt om man kan reglera mätinstrumentet efter fukthaltsvariationen i bränslet genom att utföra parallella fukthaltsmätningar. Metoder för detta är under utveckling och har redan behandlats i ett flertal tidigare studier.

I exemplena ovan har densiteten för torrt träbränsle antagits vara 150 kg/m^3 . Densiteten varierar dock något beroende på typ av biobränsle, vilket visas i tabellen nedan.

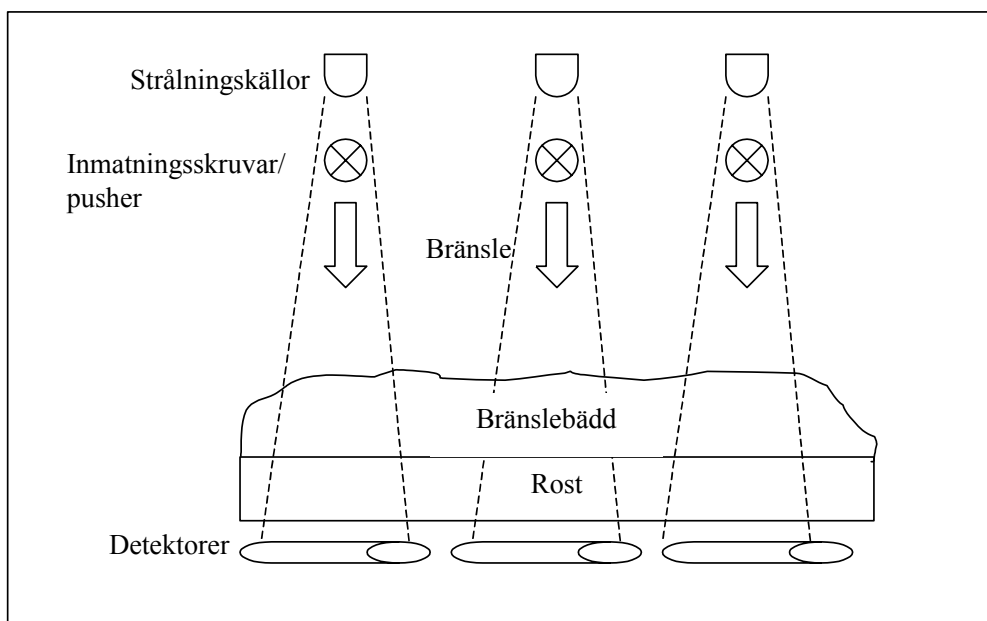
Tabell 10: Densitet för olika bibränslen (TS) [30].

Table 10: Density for different fuels, dry matter [30].

Bränsle	Densitet TS [kg/m ³]
Halm	40
Granbark och tallbark	120
Sågspån	140
Granflis, tallflis och frästörv	150
Björkflis	180
Maskintörv	185

7.2.3 Utformning för panna med flera utmatningsskruvar

En annan viktig aspekt är att om bränslet matas in i pannan med flera inmatningsskruvar måste varje skruv styras separat av varsin gammamätare för att en jämn bäddnivå ska kunna erhållas. Detektorerna bör placeras under den första delen av rosten där bränslet matas ut så att en signal kan sändas till respektive skruv för att reglera bränsletillförseln (se Figur 32).



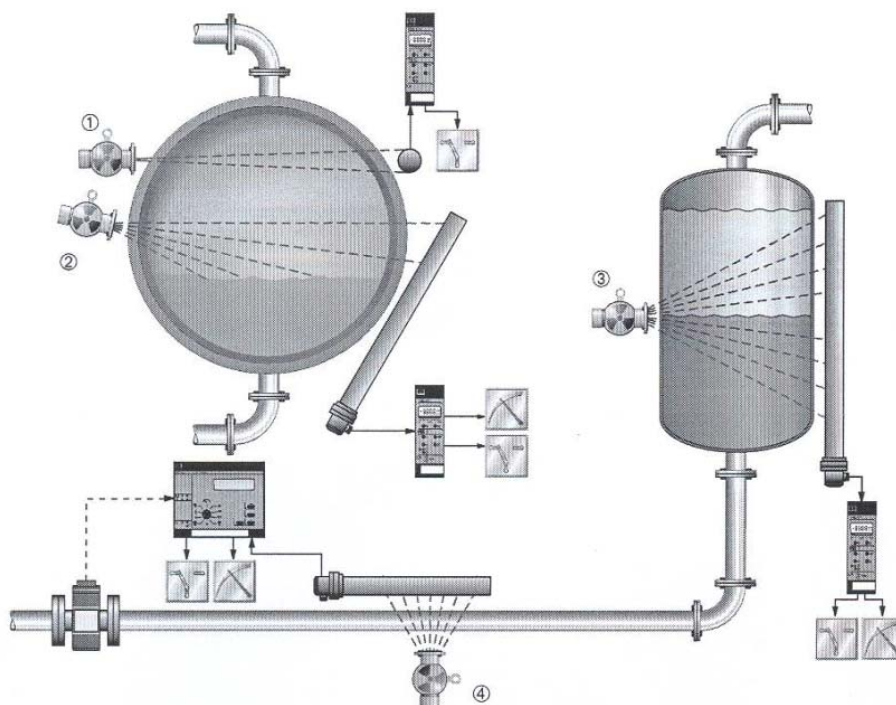
Figur 32: Genomskärningsbild för övervakning av en rostbädd med tre inmatningsskruvar för bränslet.

Figure 32: Cross-section of a grate monitoring system with three fuel feeding screws.

7.3 Andra applikationer

Endress & Hausers AB och Philips Analytical Systems är två företag som utvecklar och säljer gammautrustning för olika ändamål. Figur 33 illustrerar att mätningar med gammastrålning kan användas för olika applikationer t.ex.

- 1) gränsdetektion,
- 2) kontinuerlig nivåmätning
- 3) mätning av gränsskikt och
- 4) densitetsmätningar/flödes hastighet



Figur 33: Exempel för användning av gammamätare

Figure 33: Examples for different applications of gamma meters.

8 Ekonomiska aspekter

I Tabell 11 sammanställs approximativa prisuppgifter, exklusive moms, för mätinstrument som idag finns på marknaden. I priserna ingår ej installering av instrumenten.

Tabell 11 Ungefärlig kostnad vid inköp av instrument för avståndsmätning.

Table 11 Approximative cost of sensors for distancemeasuring.

Mätmetod	Kostnad, instrument, exkl. moms [kr]	Kommentarer
Laser	7 000 – 100 000	Beror på räckvidd och noggrannhet.
Gammagivare, nivåvakt	50 000	
Gammamätare, kontinuerlig som mäter nivå	100 000-250 000, normalpris är 150 000 för en panna med 2-3,5 m bred rost	Beror på vägg tjocklek och pannans storlek.
Ultraljud	10 000 – 30 000	Beror på räckvidd och inställningsmöjlighet.
Radar	30 000	

Laser kan variera i pris från ca 7 000-100 000 kr beroende på räckvidd och noggrannhet. De instrument som provades inom detta projekt har en noggrannhet på några millimeter och kostar mellan 10 000 och 60 000 kr. Det finns lasrar som har en noggrannhet på 0.1 mm, men dessa kostar runt 100 000 kr [26].

Generellt gäller att ju större möjlighet för applikationsinställning, samt ju längre instrumentet kan mäta, desto dyrare blir det.

Av Tabell 11 framgår att inköp av gammamätare innebär en större investering än vad övriga mätinstrument gör. Gammamätare är heller ingen standardprodukt som finns som lagervara, utan måste dimensioneras efter varje enskild panna [31].

Tabell 11 tar heller ingen hänsyn till hur många instrument som kan behövas vid rostövervakningssammanhang. Om exempelvis laser ska användas som mätmetod behövs kanske tre stycken scannande lasersensorer för att täcka ett lika stort mätområde som en gammagivare skulle göra.

Installationskostnaden för sensorerna är inte med i de angivna priserna. Installationskostnaden beror även på respektive instruments placering och behov av kylning.

9 Diskussion och slutsatser

9.1 Olika mätprincipers lämplighet i rostövervakningssammanhang

I projektet har försök genomförts med 3 olika laser- och 1 ultraljudsinstrument. Radar var med på försöksönskelistan men fick uteslutas som försöksinstrument under projektets gång. Gammamätare har ej provats, men ett förslag på en installation finns beskrivet.

9.1.1 Laser och ultraljud

Det problem som var till synes mest dominerande vid de genomförda försöken med laser och ultraljud, var stoft- och partikelhalten. För lasergivarna var även lågorna en försvårande faktor, men även när lasern inte riktades genom lågor uppkom opålitliga mätresultat, vilket antagligen beror på stofthalten. För ultraljudsmätningarna var stoftet den mest försvårande faktorn.

Laserförsöken visade att inget av de kommersiella instrumenten som provats inom detta projekt klarar av att mäta kontinuerligt i pannmiljön. De sannolika orsakerna till det är stoft- och partikelstörningar, för låg intensitet och/eller en signalbehandling som inte passar för ändamålet. Lasersensorer som mätinstrument betraktat är dock behändiga på så vis att de är lätta att kyla och kan placeras utanför förbränningsrummet. Genom att öka intensiteten och välja en laserfrekvens med en mer anpassad våglängd går det kanske att komma förbi stoftstörningarna. Projektet har dock inte haft möjlighet att få fram en laser med dessa egenskaper, eftersom det vanligtvis inte tillhör standardutbudet hos återförsäljare. Med en högre intensitet följer också andra arbetsmiljöregler.

Den laser som hade den högsta intensiteten var Riegl-lasern, med klass 3b. Riegl-lasern var också den laser, av de tre sensorerna i försök, som till synes klarade pannmiljön bäst. Eftersom det inte finns någon möjlighet att ansluta Riegl-lasern till en PC och kontinuerligt logga mätdata, är det dock svårt att jämföra denna laser med ODS 96 och ELD P.

Försöket med *ultraljud* visade att den använda ultraljudsgivaren inte fungerar som mätinstrument i pannsammanhang. Som beskrivits i teoriavsnittet om ultraljud, fungerar lågfrekventa ultraljud med hög intensitet bättre i stofrika miljöer. Det är därför möjligt att en ultraljudsgivare som arbetar med en lägre frekvens och högre intensitet skulle kunna fungera. Försöket med den ultraljudssensor som gjordes inom detta projekt visade dock ingen tendens till att ultraljud skulle kunna fungera som mätmetod.

Signalbehandlingen i instrumenten har också betydelse för instrumentets funktion. Ett ultraljud eller en laser med samma intensitet och frekvens skulle kanske fungera i pannan med en annan signalbehandling. För att undersöka det krävs att signalbehandlingen tas fram enkom för ändamålet, alternativt att man vet hur instrumenttillverkarens signalbehandling ser ut.

Om ultraljud ska få en framtid som mätmetod i pannor, måste kylningen av instrumentet lösas på ett bra och tillförlitligt sätt. Tekniken kräver att membranet som alstrar

ultraljudet sitter i direkt anslutning till pannan. Det går att ansluta ultraljudet via en reflektor, som skyddar ultraljudsgivaren från den direkta värmestrålningen från pannan. Reflektorn, som då fungerar som bärare av ultraljudet mellan givaren och förbränningsrummet, måste vara dimensionerat på så vis att ultraljudvågorna inte förändras i röret. Det skulle också gå att se över materialval i givaren och placera sensorns elektronik utanför pannan.

Det som är positivt med ultraljud som mätmetod, är dels att det inte störs av den elektromagnetiska strålningen i pannan, dels att ett högintensivt ultraljud inte utsätter människor för samma hälsorisk som en högintensiv laser. Enligt Arbetsmiljöverket kan man inte utesluta att ultraljud kan ha en skadande effekt på hörseln, men vanliga hörselskydd hjälper som skydd. Mycket talar dock för att laser har större förutsättning att lyckas som mätteknik i förbränningsugnar. Det enda sättet att påvisa det är att nyttja instrument där signalbehandlingen går att påverka och prova både ultraljud- och lasergivare med högre intensitet och lägre frekvens.

Tabell 12 listar några egenskaper, fördelar och nackdelar för ultraljud och laser. Det som talar för laser som mätmetod är att lasersystem tycks vara mer anpassningsbara efter användningsområde. Det kan gå att "skraddarsy" ett lasersystem för ändamålet; välja en optimal våglängd, intensitet och anpassa signalbehandlingen för rostövervakning. För att ett sådant projekt skall bli verklighet krävs ett djupare samarbete mellan tillverkare och experter inom laserteknik, förbränningsteknik samt signalbehandling. Ultraljudets förutsättning att lyckas som mätmetod i pannor förefaller inte lika stor, dels på grund av ljudalstringen i pannan, dels på grund av de praktiska aspekterna med ultraljudets placering i pannan.

Tabell 12: Sammanställning av laser och ultraljud.

Table 12: Tabulation of laser and ultrasonics.

	Laser	Ultraljud
Mätprincip	Elektromagnetisk strålning	Mekaniska vågor
Störningar i pannmiljön	Elektromagnetisk strålning (IR-laser) Stoft och partiklar Gas- och temperaturskikt	Ev. ljud, pannbrus Stoft och partiklar Gas- och temperaturskikt
Fördelar	Lätt att kyla Behändig storlek	Störs ej av elektromagnetisk strålning
Nackdelar	Hög intensitet innebär en arbetsmiljörisk	Kräver mycket kylning Kräver en tillräckligt stor öppning till förbränningsrum Hög intensitet kan innebära en arbetsmiljörisk

9.1.2 Radar och gammamätare

Radar fungerar som mätmetod förutsatt att mätobjektet är konduktivt. Radar kan därför inte rekommenderas som generell mätmetod i pannor, eftersom det skulle förutsätta att

- a) bränslet är av en viss fukthalt eller
- b) bädden innehåller konduktiva material, såsom kol eller metall.

Radar skulle eventuellt fungera vid biobränsleeldning, förutsatt att mätinstrumentet placerades vid inmatningen och att bränslet håller en viss fukthalt. De tillverkare som kontaktats under projektet har bedömt sannolikheten som låg att detta skulle fungera i praktiken.

Gammamätare används redan idag som nivåmätare i silos och i pannor. Ingen gammamätare kunde dock testas i detta projekt. Sändare och mottagare skulle sättas i taket respektive under roststaverna. Detta innebär att montage av sådana system är mer omfattande jämfört med en enkel hylla som kan skruvas fast vid en befintlig fläns på pannan. Det kräver dock nödvändigtvis inga ingrepp i pannan. Arbesskyddslagen ställer mycket höga krav på driftsäkerhet och hantering av radioaktivt avfall / material. Detta gör det inte möjligt att låna gammamätare för en testmätning inom det aktuella projektet. Tillstånd från Statens Strålningsinstitut krävs för drift av ett gammamätsystem.

För att tekniken med gammamätare ska fungera krävs att fukthalten är någorlunda konstant och att bädden är homogen i både vid- och djupled. Vissa typer av bränslen, t.ex. hushållsavfall, förefaller därför svåra att utnyttja som bränsle med denna mätmetod. För bränslen där fukthalten kan variera kraftigt riskerar mät noggrannheten bli oacceptabel. Den mest lämpade platsen bör därmed vara vid bränsleinmatningen, där fukthalten i bränslet är någorlunda känd. Går det att garantera en någorlunda jämn fukthalt finns stora möjligheter med metoden. Gammamätaren behöver inte monteras i förbränningsrummet och riskerar därför inte bli igensatt av stoft. En annan fördel med metoden är att stoft och partiklar inte är mer störande än att stoftets massa bidrar något till att minska strålningsstyrkan, vilket borde vara försumbart i de flesta fall. Gammamätare används redan i flera anläggningar som nivåmätare för bränslebädden i pannor och fungerar bra. En nackdel med metoden är den hälsofara den innebär om människor utsätts för strålningen.

I och med att gammamätare påverkas av densiteten i bränslet, betyder inte en försvagad gammastråle till detektorn nödvändigtvis att bäddhöjden ökat. Det kan också innebära att densiteten ökat. Om densiteten ökat, men fukthalten är konstant, innebär ofta en högre densitet ett ökat energiinnehåll i bränslet. Det betyder att gammamätare snarare är ett mått på energiinnehållet i bränslet än en bränslehöjds mätare.

Det finns enligt ovan många likheter mellan radar och gammamätare. Båda teknikerna skulle kunna vara tänkbara som mätmetod ovanför bränsleinmatningen; i det första fallet förutsätts en viss lägsta fukthalt, i det senare fallet en viss minsta fukthaltsvariation. De stora skillnaderna är att gammamätare utnyttjar den avklingande strålstyrkan, medan radarn kräver att radiovågorna reflekteras mot en yta. Gammamätaren kan sitta utanför förbränningsrummet, medan radarn måste sitta inne i det. Att gammamätaren kan placeras utanför pannan innebär en så stor fördel, att det kan vara värt att undersöka vidare i ett kommande projekt. Tabell 13 sammanfattar gammamätare och radar.

Tabell 13 Sammanställning av gammamätare och radar.

Table 13 Tabulation of gamma measurement system and radar.

	Mätprincip	Fördelar	Nackdelar	Övrigt
Gammamätare	Elektromagnetisk strålning	Monteras utanför pannan	Kräver tillstånd Hälsorisk	Rekommenderas att utreda vidare
Radar	Elektromagnetisk strålning	-	Mäter endast avstånd till konduktiva material	Rekommenderas ej

9.1.3 Bildanalys och multisensorteknik

Bildanalys är redan innan detta projekt en teknik som provats i pannor. Utvecklingen inom området går snabbt framåt och kan öppna för nya vägar till bränslebäddövervakning. Med två kameror monterade bredvid varandra t.ex. i pannans bakvägg finns det möjlighet att mäta bäddhöjden och få ut en 3D bild av strukturen. Detta kan ge möjlighet att på ett enkelt sätt styra rostzoonerna efter bäddens utseende med automatik. Ett sådant system kräver dock en hel del provning och erfarenhetsmässig inställning. Ett kamera- och bildbehandlande system kommer att kräva individuella inställningar för varje panna då förbränningsrummets utformning påverkar bäddens struktur och förbränningsbilden. Det är viktigt om detta provas i nära samarbete med driftpersonalen då tidigare system inte har använts eftersom det har varit problem med hårdvara samt alltför känslig inställning vilket har resulterat i felmätningar. Även för denna mätteknik är stoft- och partikelhalten ett problem. Det finns dock möjlighet att med hjälp av bildanalys ”sudda ut” stoftet i bilden. Teoretiskt borde det alltså vara möjligt att mäta distansen till bädden med bildanalys genom att filma bädden med två kameror, reducera bort stoftet på bilderna, och därefter räkna ut distansen till bädden.

Om det går att hitta en tillförlitlig metod att mäta avståndet till bränslebädden, finns stor potential för vidare utveckling av *multisensortekniken*. Bilden av förbränningstillståndet blir mer komplett om två fristående mätparametrar kan kombineras och integreras. T.ex. om värdet från en temperaturgivare kan kombineras med värdet från en avståndsgivare, hamnar bedömningen av förbränningstillståndet hos processtysystemet närmre verkligheten än om enbart avståndsmätaren finns. Den samlade bilden ligger sedan till grund för regleringen av pannan.

9.1.4 Allmänt

Ur ett *ekonomiskt perspektiv* är gammamätare det dyraste alternativet att köpa in. Utvecklingen visar dock att en fungerande rostbäddövervakning måste utvecklas och trots en stor investering i mätinstrument blir det lönsamt i längden. Vinsterna med en tillförlitlig rostövervakning är att rostregleringen blir snabbare och förbränningen mer kontrollerbar. Därmed kan en stabilare drift och mindre emissioner av miljöfarliga

ämnen förväntas, och de miljövillkor som ställs uppfylls lättare. På sikt medför detta både ekonomiska och miljömässiga vinster.

I kapitlet om *signalbehandling* beskrivs hur behandlingen av mätsignalen kan delas upp i olika steg. Steg 1 beror på pannmiljön och steg 2 av tillverkaren av mätinstrumentet. Steg 3 och 4 ger däremot utrymme för användaren att forma signalen till något ändamålsenligt. För att hitta den mest lämpade lasersensorn för mätning i pannor skulle det vara en fördel att veta hur signalbehandlingen ser ut redan i instrumentet, steg 2. Detta är inte möjligt i de kommersiella systemen som finns att köpa idag. Det vore också intressant att få vara med och påverka hur signalbehandlingen i sensorn ser ut redan innan tillverkningen. För att det ska vara möjligt krävs ett samarbete med tillverkare av sensorer. Om marknaden är tillräckligt stor kan det finnas intresse från tillverkarnas sida att medverka i en utveckling av en prototyp av laser för pannmiljöer.

Stoft och partiklar försvårar för så gott som alla mätmetoder; spridningen ökar, instrumenten sätts igen eller stoftet skymmer sikten i bildanalyssammanhang. Även i andra projekt där IR-sensorer använts har stofthalten varit ett problem. Gammamätaren är den enda mätmetoden som inte störs av stoft och är därför intressant att undersöka vidare.

Under försökstiden i Gärsdaverket kunde flera relevanta punkter med hänsyn till själva genomförandet identifieras. För att underlätta framtida mätningar (mer eller mindre oberoende av vilken mätteknik som används) är det en fördel om pannan har flera optiska tillgångar, dvs. siktfönster på olika väggar, vid bränslein- och askutmatning och på sidoväggar. Mätningar från pannans tak kan vara intressant, men med tanke på de vanligtvis höga halterna av stoft och andra partiklar i rökgasen är denna mätposition inte lämplig för flera av de valda mätmetoderna.

Det har visat sig att det även är en fördel om själva fönstret eller kopplingsflänsen är så stor så möjlig. Det underlättar montage av mätutrustning och koppling av denna till sekundärsystem, t.ex. kylluft. Dessutom underlättar ett stort fönster t.ex. inriktning av en laser.

9.2 Mätinstrumentens placering

Rostbädden och förbränningen är indelad i olika zoner, vars karaktärer skiljer sig markant från varandra. En mätteknik som lämpar sig i en zon behöver inte fungera i en annan, även om det förstås vore praktiskt.

Torkzonen:

I torkzonen har bränslet inte börjat brinna ännu och stofthalten är låg. Den låga andelen lågor och stoft gör lasertekniken till en möjlig mätmetod.

Vid imatningen, alldeles i början av torkzonen borde även gammamätare fungera bra, pga att fukthalten är någorlunda konstant.

Avgasnings- och förbränningszonen:

Ingen mätmetod som försök gjorts med inom detta projekt har gett tillräckligt bra resultat för att vara aktuella för drift i förbränningszonen. Om det var möjligt att få fram en laserprototyp, med anpassad intensitet, signalbehandling och våglängd, kan laser vara en möjlig mätmetod. Av de kommersiellt tillgängliga mätsystemen idag förefaller IR-sensorer vara mest lämpad för mätning i förbränningszonen.

Rostövervakning med laser kan antingen gå till så att en eller flera lasersensorer mäter stationärt avståndet till varsin punkt, vilket sedan räknas om till bäddhöjden i punkterna. Alternativt kan en laser scanna över bädden och rita upp en kurva över bäddhöjden.

9.3 Kommersiellt tillgängliga mätsystem eller en prototyp?

Projektet har i första hand varit inriktat sig på att prova instrument som finns tillgängliga på marknaden. Då dessa inte har visat sig fungera tillräckligt bra har möjliga orsaker utretts och diskuterats. På basis av dessa kunskaper har vissa lämpliga utvecklingslinjer identifierats för att mätning i pannor ska bli möjligt. De förbättringar av systemen som skulle krävas har dessvärre inte varit möjliga att gå vidare med inom ramen för detta projekt. De kommersiellt tillgängliga instrumenten är utvecklade för miljöer som skiljer sig från pannmiljön och chansen att hitta t.ex en laser som fungerar väl i pannor är liten.

Som beskrivits tidigare kräver laser en högre intensitet för att ge en stabil retursignal. Marknaden för sådana instrument är begränsad och en högre intensitet innebär en annan laserklass med fler säkerhetsföreskrifter. För att komma vidare med laser som mätmetod bör kontakt tas med tillverkare för att ta fram en mer lämpad laser. Eventuellt krävs ingen djupare utveckling för att få fram en sådan, utan en enkel modifiering i sensorns signalbehandling i kombination med en högre intensitet kan räcka för att få en laser att fungera i pannmiljön.

En prototyp av detta slag bör se ut på följande vis:

- Lång våglängd / låg frekvens för att minimera spridningen orsakad av stoft. Om möjligt bör våglängden ligga på en frekvens där strålningen från elden är låg.
- Laserns intensitet bör ökas. I detta projekt har lasrar upp till klass 3b provats. Det som begränsar intensitetsnivån uppåt är break through. För luft sker detta vid $1,5 \cdot 10^{13} \text{ W/m}^2$, vilket skall jämföras med 25 W/m^2 som är gränsen för klass 3a. Det borde alltså inte finnas risk för break through om intensiteten höjs något.
- Lasern bör vara pulsad (TOF), för att möjliggöra reduktion av brus i signalbehandlingen.
- Signalbehandlingen i sensorn anpassas för den stofrika miljön och strålningen från elden.

För att en tillverkare skall vara intresserad av att ta fram en prototyp som passar för detta ändamål, krävs att marknaden för instrumentet anses tillräckligt stor eller att prototypen är betald innan tillverkningen.

I militära applikationer finns avståndsmätande lasersensorer som t.ex är utvecklade för att leta efter markytan, och eventuella fordon, i en tät skog som vajar för vinden. Problematiken i detta fall är ungefär densamma som i pannor, dvs vi önskar att signalbehandlingen i lasern skall kunna "sortera ut" de mätvärdena som representerar avståndet till marken och ignorera avståndet till trädtopparna, trots att det senare dominerar avståndsvärdena. På samma sätt vill vi att lasersensorn i en panna sorterar ut det uppmätta avståndet till bränslebädden, trots att avståndsvärdena till eventuellt stoft dominerar vid avståndsmätningen. Signalbehandlingen i en framtida laser för rostövervakning skulle alltså kunna utformas på ett liknande sätt som de lasersystem som redan finns inom militären.

Det bör noteras att signalbehandling och sensormodellering innehåller åtminstone tre tidsskalor: enskilda pulser (storleksordningen mikrosekunder), flammans variationer (storleksordningen sekunder) och hela bäddens förändring (storleksordningen några minuter). För att få ett bra mätsystem med laser är det viktigt att dessa tre delar integreras på ett robust sätt. Samspelet mellan de tre delarna är viktigt. Nedan ges en uppräknings av några relevanta slutsatser [32].

- Enskilda pulser; 10 – 100 mikrosekunder

Då laserpulsen går genom flammorna uppstår spridning i partiklarna samt absorption. Vidare kommer flammornas höga ljusintensitet att störa detektorn. Resultatet blir att:

1. Detektorn nås av flera överlagrade ekon från både partiklarna i flammorna och från bädden. Vi söker ekot från bädden, dvs sista större ekot. Detektorn skall alltså "trigga" på pulsens bakkant. I de flesta befintliga system triggar detektorn på framkanten av pulsen (den är som regel skarp). I bättre mätsystem erhålls både första större eko, sista större eko samt största ekot i hela pulsen.

2. Spridningen av laserljuset mellan partiklarna är det största principiella hindret för ett fungerande mätsystem. Denna spridning gör att laserpulsens "foot-print" växer snabbt då pulsen propagerar genom flammen. Förloppet är det samma som när man lyser med en laserpekare i ett glas mjölk (mjölken i glaset ser ut att vara rosa). Systemets vinkelupplösning degraderas kraftigt. Pulsens intensitet avtar snabbare än $1/(\text{avståndet})^2$, varför detektorn får svårigheter att sätta signalnivåtröskeln rätt.

3. Den kraftiga utstrålningen från flammorna hanteras med smalbandiga optiska filter och höjd effekt hos lasern. I den militära applikationen är det antalet pulser som går igenom som är bestämmande. Effekten hos lasern påverkar mätningen mindre.

- Flammans variationer; sekunder

Lasern är snabb och det är i princip möjligt att mäta mellan flammorna. Lasern skall alltså inte vara stirrande utan scanna över bädden. Den skall gärna förflytta sig mer än en laserpunkts diameter mellan pulserna för att ge ett nytt fall.

Den mest kraftfulla lösningen för att kompensera för flammans variationer är att digitalisera hela ekosignalen med t.ex. 15 cm upplösning (< 1 nanosekund i sampling) och sedan göra detektorn helt i mjukvara. Korta laserpulser är en fördel. För enskilda partiklar fås diffraktion som gör att lasern i princip ser genom stoft. Detta beror på att när en partikel sprider ljuset så kommer delar av ljuset att fortsätta genom stoftet ner till bädden. Bädden ger ett eko om än svagt och utsmetat.

Denna mätstrategi har visat sig effektiv då man vill mäta marken genom vegetation eller havsbotten genom vatten.

- Bäddens translation och förändring; minuter

Processen i pannen är långsam i meningen att ytprofilen ändras långsamt. Translationen är i princip känd och bädden har en medelhastighet om ca 4 mm/sekund. Höjdändringen uppskattningsvis 0.25 mm/sekund.

Betrakta 2 meter i rostriktningen (x-led) av en 5 meter bred bädd (y-led). Under 250 sekunder hinner bäddavsnittet förflytta sig 1 m, dvs halva längden. Dagens lasrar ger 10 000 mätningar/sekund vilket ger 2 500 000 mätvärden. Det räcker att 1 puls på 1 000 når bädden. De andra 999 kan fastna i stoft och flammor. Det bör noteras att det som söks kan beskrivas som undre envelopen till ett antal mätvärden. En direkt analogi är fallet med en helikopterburen laser som letar efter markytan och eventuella fordon i en tät skog som vajar för vinden [32].

Lasern skall ha en smal strålradi, vilket ökar oddsen att ekot kommer från bädden. Vidare kan nämnas att robust signalbehandling är baserad på "order statistics", "clustermetoder", histogram, medianfilter mm. Traditionell filtrering och medelvärdesbildningar brukar i dessa fall göra mer skada än nytta [32].

Modellbaserad signalbehandling är viktigt där man verkligen använder matematiska / stokastiska modeller av både fysiken och sensorerna. Detta kan verka osäkert, men liknande beräkningar för atmosfär och markegenskaper (vid spaning, målsökare mm) brukar vara rätt inom ± 10 dB. Detta brukar räcka för dimensionering av adaptiva detektorer [32].

10 Rekommendationer och förslag till fortsatt forskningsarbete

Med tanke på behovet av en fungerande rostövervakning måste arbetet med att få fram en väl fungerande mätmetod fortsätta. Vår bedömning är att laser och gammamätare har störst potential att lyckas. Vi rekommenderar att det fortsatta arbetet med laser och gammamätare ser ut så här:

- avståndsmätande laser; i samarbete med laserexpertis och tillverkare utforma och tillverka ett lasermätsystem anpassad för pannmiljön för vidare försök
- gammamätare; i en panna installera gammamätare vertikalt vid bränsleinmatningen, vilket möjliggör styrning av varje enskild inmatningsskruv.

Båda projektförslagen kommer kräva stora personella och ekonomiska resurser för att genomföra. Installering av gammamätare kan enbart vara aktuellt vid inmatningen. Laser har störst potential i torkzonen, men beroende på hur våglängdsval, intensitet och signalbehandlingsmetod kan anpassas finns det en chans att laser kan fungera i avgasnings- och förbränningszonerna.

Radar och ultraljud kan inte rekommenderas som mätinstrument i nuläget. Innan ultraljud kan uteslutas helt som mätmetod i pannor bör ett försök med ett lågfrekvent ultraljud genomföras. Ett sådant projekt kräver inte samma insats som de föreslagna projekten med laser och gammamätare, utan kontakt med återförsäljare kan räcka. Signalbehandlingen i ultraljudsgivare kan, liksom i lasergivare, anpassas till ändamålet. Om ett lågfrekvent ultraljud visar tecken på att fungera i pannmiljön finns även utrymme att gå vidare med ett framtagande av en ultraljudsprototyp på liknande sätt som för laser.

Allmänt kan man konstatera att om ett mätsystem ska vara lämpligt för kommersiell användning så ska det uppfylla vissa krav:

- enkel konstruktion
- driftsäkert och pålitligt
- lätt att hantera av personal

Projektet har tagit fram kunskap om ett flertal olika mätsystem. Försöken lyckades dock inte identifiera kommersiella sensorer som var direkt tillämpbara för rostövervakning. Detta berodde delvis på hög partikel- och stofthalt vid askutmatning. Däremot är det möjligt att systemen fungerar bättre vid bränsleinmatningen.

Laser har den stora fördelen att mätningar kan genomföras från pannans utsida genom ett fönster. För framtida försök / projekt bör kontakt med företag etableras som tillverkar laser och laser applikationer. Att skräddarsy ett lasersystem för avstånds- och / eller temperaturmätningar gör det möjligt att anpassa laserns våglängd, intensitet och signalbearbetning för just de förhållanden som råder i den aktuella anläggningen. Nackdelen är förstås de höga kostnader för att skräddarsy ett sådant mätsystem.

En mycket angelägen utvecklingsinsats för att öka av automatiserad rostövervakning vore att installera laser och/eller gammagivare vid bränsleinmatningen i en panna som ett utvecklings- och demonstrationsprojekt.

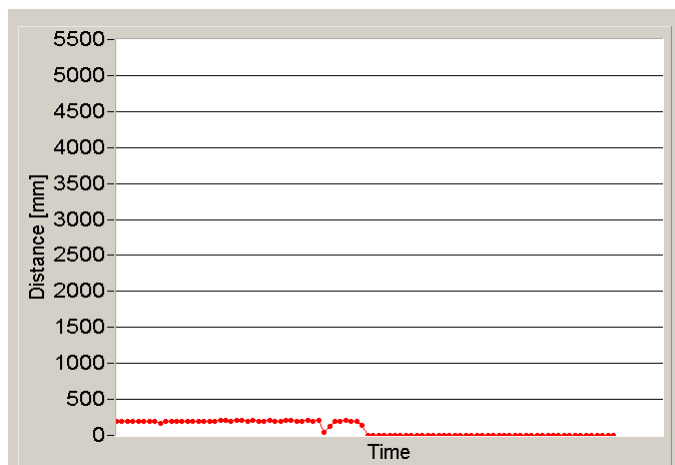
11 Referenser

- [1] Blom E; "Metoder för rosterövervakning, dagslägesbestämning", SVF 721, Stockholm januari 2001
- [2] Schuster R, Carlsson M, Hallgren A, Kallner P, Ljungdahl B, Malmgren A, Olsson E, Rudling L, Zethraeus B, Zintl F; "Användning av IR-sensorteknik för kontroll/optimering av bäddförbränningen vid rosteldning" TPS Branchforskning för energiverk, SVF 606, Stockholm maj 1997
- [3] Värmeforskrapport SVF 660, "Etapp 1 Diagnos och analys av nuläge"
- [4] Värmeforskrapport SVF 710 "Etapp 2 Redovisning av generella möjligheter och tillämpning på fyra utvalda anläggningar"
- [5] Värmeforskrapport SVR 789 "Möjligheter till förbättrad drift av skogsindustrins barkpannor genom optimerad förbränningsteknisk styrning - etapp 3"
- [6] Schuster R, Edholm A, Franzén L; "Möjligheter till förbättrad drift av skogsindustrins barkpannor genom optimerad förbränningsteknisk styrning, etapp 1 Diagnos och analys av nuläge", SVF 660, Stockholm januari 1999
- [7] Schuster R, Lundborg R; "Möjligheter till förbättrad drift av skogsindustrins barkpannor genom optimerad förbränningsteknisk styrning, etapp 2 Redovisning av generella möjligheter och tillämpning på fyra utvalda anläggningar", SVF 710, Stockholm 2000
- [8] Schuster R; "Möjligheter till förbättrad drift av skogsindustrins barkpannor genom optimerad förbränningsteknisk styrning, etapp 3 Demonstration", SVF 789, Stockholm augusti 2002
- [9] Löfström C, Aldén M; "Temperature measurements by a laser technique in flame of a natural gas fired full scale boiler", LRPC-7 Lund Institute of Technology, Lund 1992
- [10] Löfström C, Aldén M; "Temperature measurement with the pulsed laser technique, CARS, in the Jordbro, 75 MW boiler, with bio powder fuel", LRPC-50, Lund Institute of technology, Lund University, Lund 1999
- [11] Löfström C; "Visualisation with a pulsed laser technique in the Jordbro, 75 MW boiler with bio powder fuel", LRCP-55, Lund Institute of Technology, Lund 1992
- [12] Martin GmbH; "Process for regulating individual factors or all factors influencing combustion on a furnace grate", United State Patent, nr 5.606.924, mars 1997
- [13] Samtal mellan E. Blom och Bernt Nilsson, Birka Värme Hudiksvall
- [14] Wöstenkühler, G.W.; "Vorlesungsunterlagen Messtechnik", Fachbereich Automatisierung und Infomatik, Fachhochschule Harz, 2002
- [15] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.; "Physik für Ingenieure", VDI-Verlag ISBN3-18-400916-5, 1989
- [16] Strålning – Risk och Nytt, Information från Statens Strålskyddsinstitut
- [17] Kursmaterial från Lunds Tekniska Högskolan, <http://kurslab-atom.fysik.lth.se>, April 2003
- [18] Kursmaterial från Kungliga Tekniska Högskolan <http://www.biox.kth.se/gmcourses/optmaet/ranging.htm>, April 2003

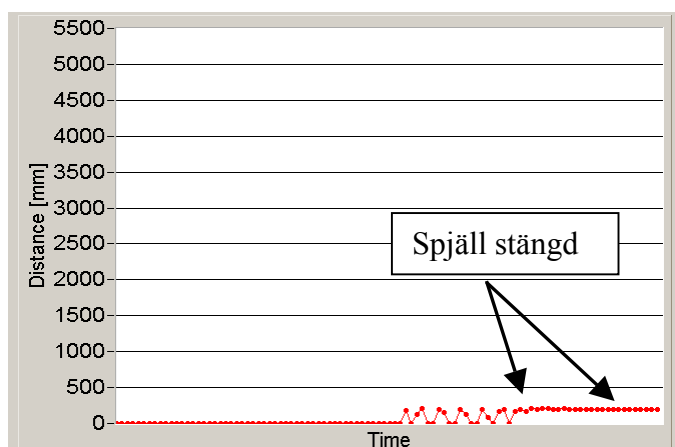
-
- [19] IEE Automatisierung und Datentechnik; "Abstandsmessung prinzipiell beleuchtet", 47. Jahrgang, 2002
 - [20] Turns S; "An introduction to combustion, concepts and applications", McGraw-Hill Companies, 2000
 - [21] Eckbreth A C; "Laser diagnostics for combustion temperature and species", United Technologies Research Center East Hartford, Gordon and Breach Publishers, Connecticut 1996
 - [22] Kocis S, Figura Z, "Ultrasonic measurements and technologies", Chapman & Hall, 1996
 - [23] Schaaffs W., Molekularakustik, Springer Verlag, Berlin, 1963
 - [24] Jansing, F., "Ultraschallanwendungen in der Verfahrenstechnik", Examensarbete, Fachhochschule Köln, Anlagen und Verfahrenstechnik, 1999
 - [25] Fylling P; Leuze Sensor Gruppen, telefonsamtal 030416
 - [26] Svensson H; Leuze Sensor Gruppen, telefonsamtal
 - [27] Högberg L; Wesmar AB, telefonsamtal 030423
 - [28] Philips Analytical Systems, produktblad "Scientific & Analytical Equipment"
 - [29] Endress & Hausers hemsida, produktblad, www.endress.se
 - [30] Olausson Artur & Berglund Anders, "Konvertering av koleldade pannor till inhemska bränslen", Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning, maj 1982
 - [31] Larsson U; Endress + Hauser AB, telefonsamtal
 - [32] Wernersson Å; Professor i Robotik vid Institutionen för Systemteknik, Luleå Tekniska Universitet, samt adj. Forskningschef, FOI, Linköping

Bilaga 1 - Mätserier med ODS 96 5m

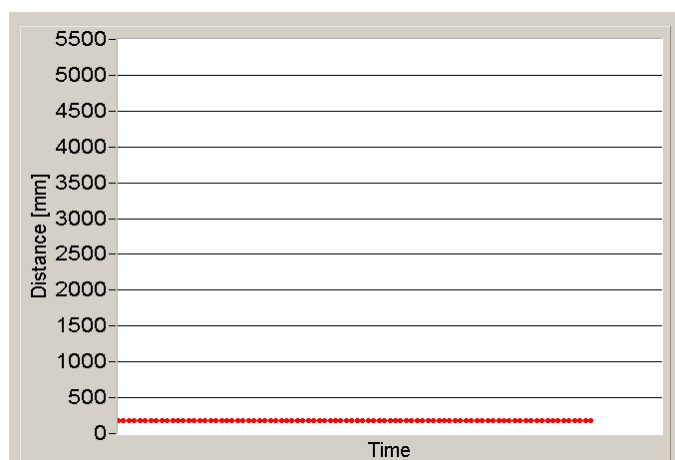
Denna bilaga redovisar mätresultat från mätningar med ODS 96 mätsystem.



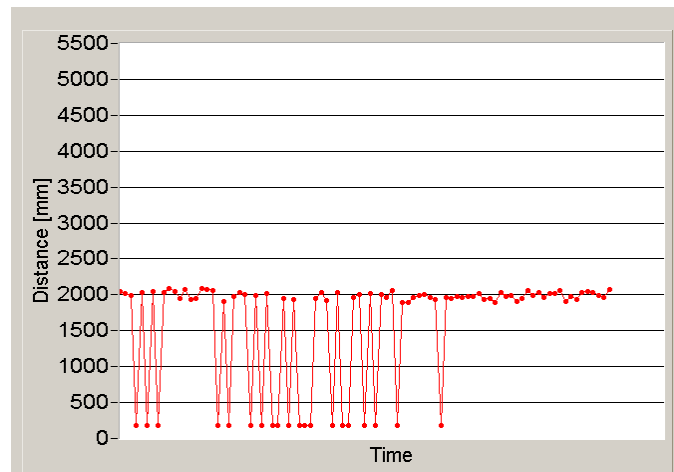
Mycket stoft i rökgasen, stark nedsatt sikt. Lasern är riktad mot bränslebädd.



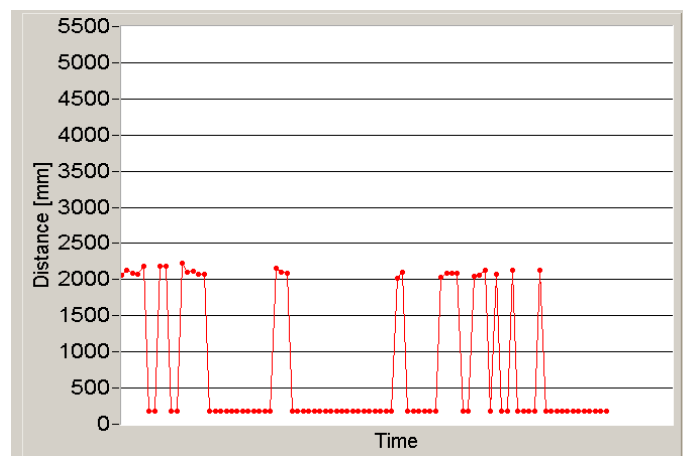
Stoftrika rökgas, sedan spjället nedfällt.



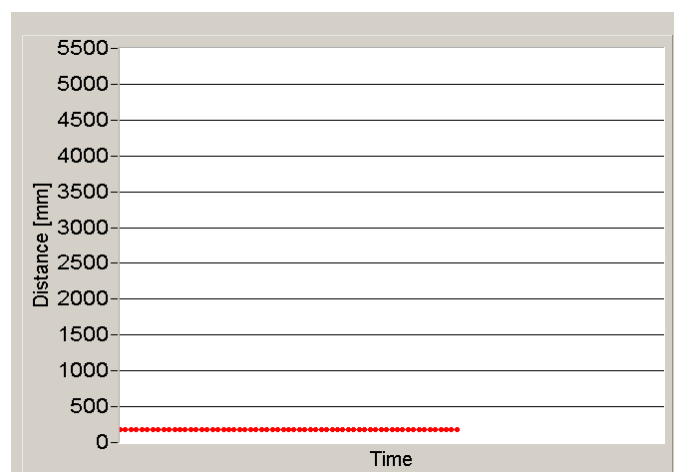
Mycket stoft i rökgasen, stark nedsatt sikt, lasern riktad mot slaggutmatningen.



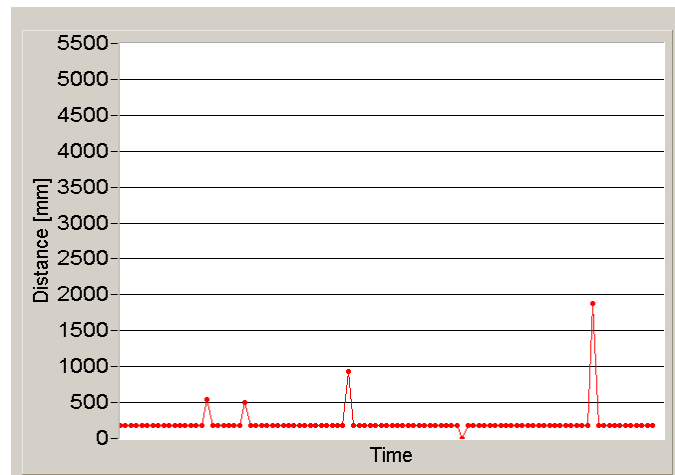
Lasern riktad mot rostbädden, precis vid nedfallet. Alltså inte mot aska eller genom lågor. Lite stoft.



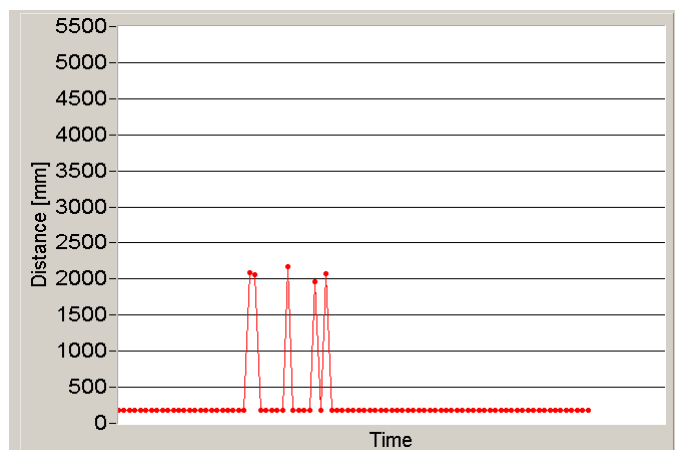
Mot aska vid nedfallet. Lite stoft.



Samma ställe, mycket stoft.

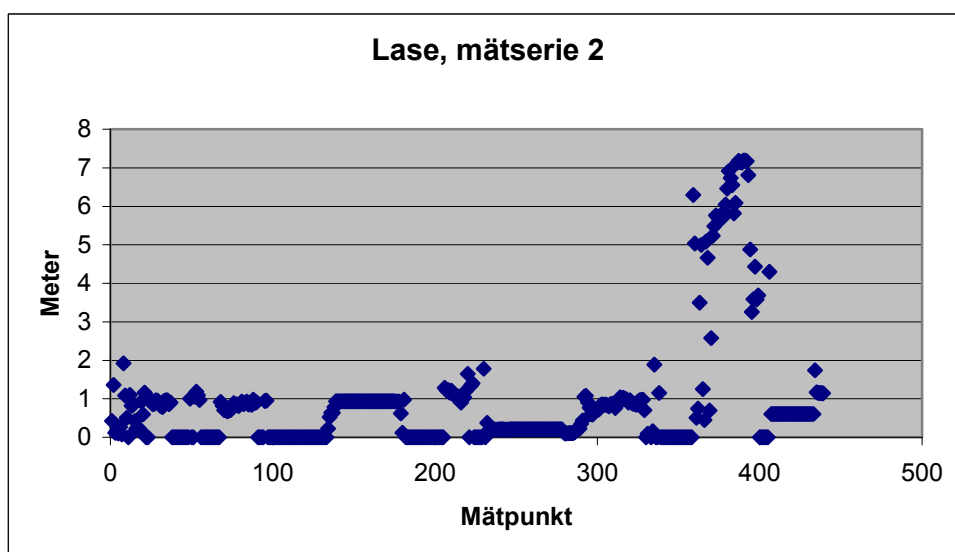
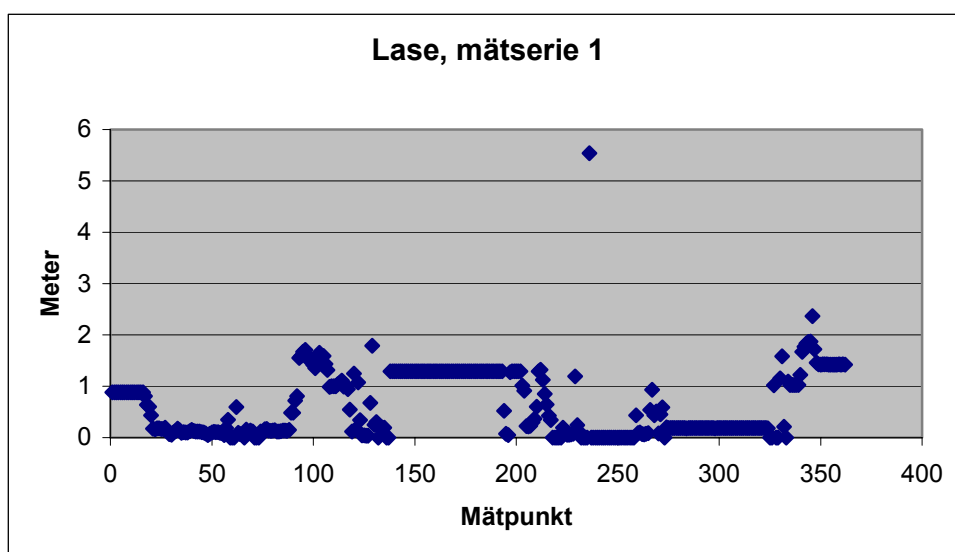


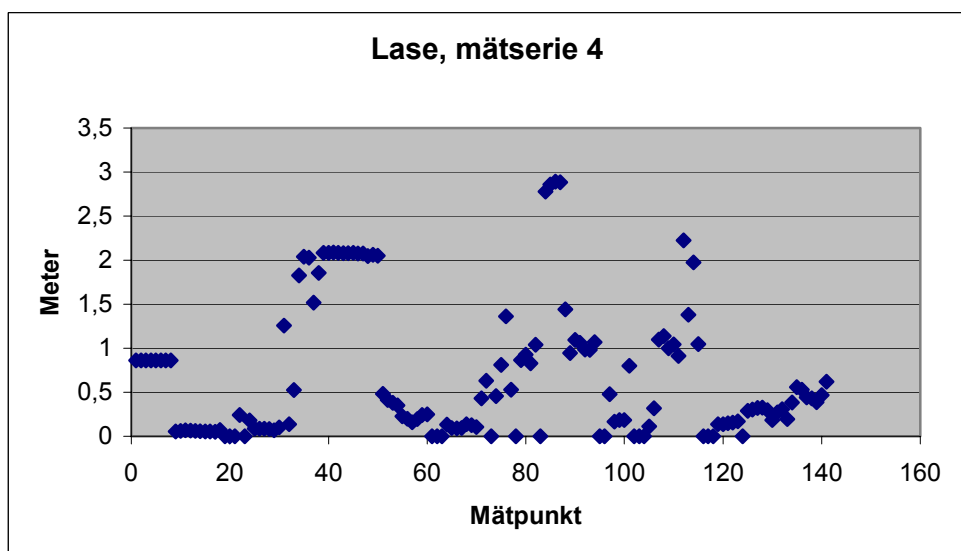
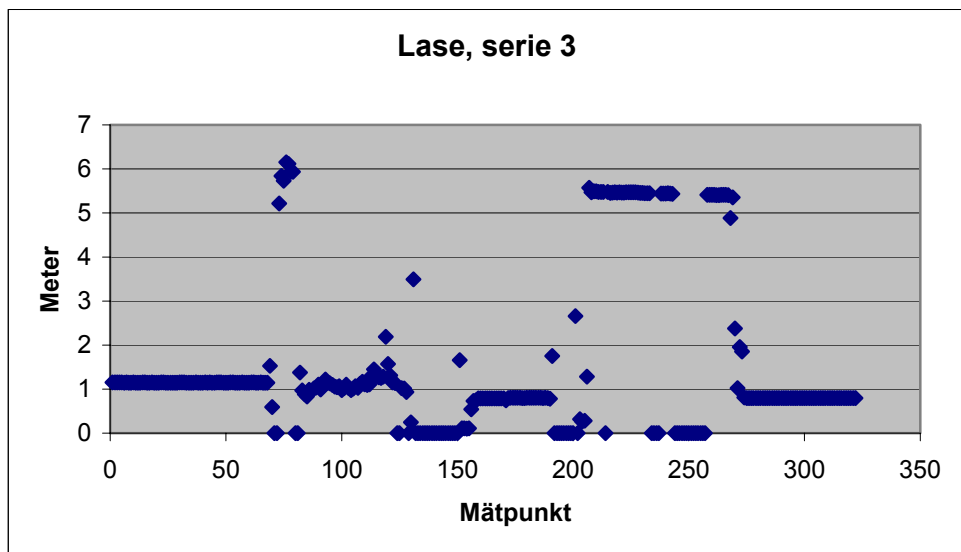
Mätning mot panncenter



Mot nedfallet igen, halvmycket stoft.

Bilaga 2 - Mätserier med Lase ELD P 20





Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35