



Høgskolen i Telemark

Teknologiske fag

Master/Sivilingeniør Prosessteknikk

HOVEDOPPGAVE 2006/2007

Student: Espen Jørgensen, 2PT

Tittel : Spredning og antenning av hydrogen – Background
Oriented Schlieren (BOS) visualisering



Teknologiske fag

Adresse: Kjølnes Ring 56, N-3914 Porsgrunn, Norge, tlf: +47 35 57 50 00, fax: +47 35 55 75 47

Lower Degree Programmes - M.Sc. Programmes - Ph.D. Programmes



Høgskolen i Telemark

Teknologiske fag

Master/Sivilingeniør Prozessteknologi

HOVEDOPPGAVERAPPORT, KURSKODE F4203

Student : Espen Jørgensen, 2 PT
Tittel : Spredning og antenning av hydrogen - Background Oriented Schlieren (BOS) visualisering

Signatur :

Antall sider : **95**

Nøkkelord :
.
.
.

Hovedveileder : Prof. Dag Bjerketvedt sign.:

Biveileder : Ole Kristian Sommersel sign.:

sign:

Sensor : sign.:

Ekstern partner :

Tilgjengelighet : Åpen

Godkjenning for arkivering (Hovedveileders signatur): **Dato:** . 23.02..2007.

Sammendrag:

Rapporten er delt inn i tre deler. Første del er et litteraturstudie som omhandler tidligere undersøkelser og evalueringer av "Background Oriented Schlieren"-fotografering (BOS) og hvilke anvendelsesområder den kan benyttes i.

Andre del omhandler praktiske forsøk gjort med BOS fotografering i forsøkshall.

Tredje del tar for seg de visualiseringer som er gjort for hver film.

Litteraturstudiet gikk inn på å vise forskjellige måter BOS kan benyttes i når det gjelder studier av gasspredning og endringer i luft, samt typiske hendelser hvor BOS fotografering er til stor nytte (for eksempel ved sjokkbølger, varmeovergang, forbrenning og lekkasjer).

Forsøksdelen ble gjort på Høgskolen i Telemark, i en egnet forsøkshall. Det ble først gjort tester for å vurdere optimale forhold for fotograferingen og deretter forsøk med hydrogenutslipp for å se BOS under praktiske forhold. Kameraet som ble brukt var X-Stream XS-3 High Speed kamera..

Eksperimentfilmene ble behandlet med dataprogrammet Matlab, hvor massetetthetsgradientene til hver gasstrøm ble isolert og visualisert, slik at man kunne få best mulig innsikt i hvordan en gasstrøm spres under et utslipp.

Høgskolen i Telemark står ikke til ansvar for resultatene og konklusjonene presentert i denne rapporten.

FORORD:

Rapporten er utarbeidet som et resultat av hovedoppgaven "Spredning og antenning av hydrogen – Background Oriented Schlieren (BOS) visualisering" ved Masterutdanningen for Prosessteknologi ved Høgskolen i Telemark.

Jeg vil gjerne få takke følgende personer for veiledning og støtte under arbeidet med oppgaven.

Hovedveileder Professor Dag Bjerketvedt

Biveileder Ole Kristian Sommersel

23.02..2007



Espen Jørgensen

FIGURLISTE:

Figur 2-1a	Optisk mønster uten forstyrrelser.	Side 11
Figur 2-1b	Optisk mønster med forstyrrelser.	Side 11
Figur 2-2	Et enkelt oppsett for BOS- målinger.	Side 13
Figur 2-3	Et typisk BOS- oppsett for optimalisert oppløsning.	Side 14
Figur 2-4	Sammenheng mellom følsomhet, oppløsning i et BOS- oppsett.	Side 15
Figur 2-5	Flytskjema for tetthet-/og temperaturmålinger med BOS	Side 16
Figur 2-6	Faseobjekt plassert mellom bakgrunn og kamera – BOS Teknikk.	Side 17
Figur 2-7	Skisse som viser faseobjektets innflytelse på lysstråler – BOS Teknikk.	Side 19
Figur 3-1	Synkron ballistisk fotografering med BOS teknikk	Side 21
Figur 3-2	Skjematisk BOS- oppsett fra rapport av <i>Mee et al. (2004)</i>	Side 22
Figur 3-3	Referansebilde med stillestående strøm.	Side 23
Figur 3-4	Referansebilde med stillestående strøm.	Side 23
Figur 3-5	Bilde med laminær strøm i strømningsfeltet.	Side 23
Figur 3-6	Bilde med laminær strøm i strømningsfeltet.	Side 23
Figur 3-7	Tegning av vindretning mot en flyvinge.	Side 24
Figur 3-8	Forsøksoppsett i vindtunnel.	Side 25
Figur 3-9	Optisk bane med et BOS- oppsett med to kameraer.	Side 27
Figur 3-10	Ved forplantninger av en lydbølge på modellens overflate.	Side 30
Figur 3-11	Prinsippielt BOS- oppsett og geometriske egenskaper for kalibrering av teknikken.	Side 30
Figur 3-12	Hastighetsfordeling i en transonisk strøm i en turbin.	Side 31
Figur 3-13	Tetthetsgradienter i en transonisk strøm i en turbin.	Side 32
Figur 3-14	Optisk oppsett for å motta BOS- bilder av ikke-homogene strømninger.	Side 33
Figur 3-15	Visualisering med BOS - Typisk temperaturfordelingsområde, hastighetsfelt og formendring i en enkel platefuge.	Side 33
Figur 3-16	Et eksempel på gassutslipp visualisert vha BOS- teknikk .	Side 34
Figur 3-17	Skjematisk tegning av BOS- oppsett	Side 37
Figur 3-18	Varmeoverføring gjennom glass.	Side 39

Figur 3-19	Høyhastighetsfotografering av rifleskudd av kaliber 30-06.	Side 40
Figur 3-20	Bildebehandling av sjokkbølger med BOS.	Side 41
Figur 4-1	Forsøksoppsettet i Maskinhall ved Høgskolen i Telemark	Side 43
Figur 4-2	Nærbilde av bakgrunns mønsteret i Forsøksoppsettet	Side 44
Figur 4-3	Test 1 fra 26.09.06 Stillbilde m/bakgrunn	Side 45
Figur 4-4	Test 5 fra 26.09.06 Flammen var på	Side 46
Figur 4-5	Test 7 fra 26.09.06 Flammen var på	Side 47
Figur 4-6	Test 7 fra 26.09.06 visualisert vha Matlab - Flammen var på	Side 48
Figur 4-7	Test 1 fra 10.10.06 Vegg 3 meter unna	Side 50
Figur 4-8	Test 1 fra 10.10.06 visualisert vha Matlab -Vegg 3 meter unna	Side 51
Figur 4-9	Test 3 fra 10.10.05 Endret eksponeringstid	Side 52
Figur 4-10	Test 4 fra 10.10.06 visualisert vha Matlab - fokus mellom 3 og 1,5 meter	Side 53
Figur 4-11	Test 6 fra 10.10.06 – 1.4 –1.3 meter til bakgrunn	Side 54
Figur 4-12	Viser den nest største dimensjon av bakgrunnen.	Side 55
Figur 4-13	Test 1 fra 20.11.06 – visualisert vha Matlab - 3 meter fra bakgrunn	Side 58
Figur 4-14	Test 3 fra 20.11.06 – Bakgrunn 2 meter unna	Side 59
Figur 4-15	Matlab- prosessert bilde fra test 1 – dette var det mest representative bilde for testene den 22.01.07	Side 62
Figur 4-16	Matlab- prosessert bilde fra test 4 den 22.01.07	Side 63
Figur 4-17	Matlab- prosessert bilde fra test 6 den 22.01.07	Side 64
Figur 5-1	Hydrogenoppsett fra 16. februar 20.02.07	Side 68
Figur 5-2	Matlab- bilde fra test 1 fra 16.02.07 - Varmebølger observert	Side 70
Figur 5-3	Matlab- bilde fra test 2 fra 16.02.07 - Varmebølger observert	Side 71
Figur 5-4	Matlab- bilde fra test 3 fra 16.02.07 - Varmebølge m/virvler	Side 72
Figur 5-5	Matlab- bilde fra test 5 fra 16.02.07 - Tynn laminær strøm	Side 73
Figur 5-6	Matlab- bilde fra test 6 fra 16.02.07 – Svakere visualisering	Side 74
Figur 5-7	Matlab- bilde fra test 7 fra 16.02.07 - Bølgebevegelse, m/virvler	Side 75
Figur 5-8	Matlab- bilde fra test 10 fra 16.02.07 – Tynn varmebølge	Side 76

TABELL- LISTE:

Tabell 4-1	Forsøk fra 26.09.06 med stillbilder og film	Side 49
Tabell 4-2	Forsøk fra 10.10.06 m/optimalisering	Side 57
Tabell 4-3	Nye forsøk m/stearinlys fra 20.11.06	Side 61
Tabell 4-4	Siste forsøk m/stearinlys fra 22.01.07	Side 66
Tabell 5-1	Resultater fra forsøk med Hydrogen 16.02.07	Side 81

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	INNLEDNING	8
2	STUDIE AV "BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN" (BOS) FOTOGRAFERING.....	10
2.1	SCHLIEREN FOTOGRAFERING	10
2.1.1	<i>Optisk mønster uten og med forstyrrelser.</i>	<i>11</i>
2.2	BOS-FOTOGRAFERING	12
2.3	BOS-PRINSIPP.....	12
2.3.1	<i>Et typisk BOS-oppsett for optimalisert oppløsning.</i>	<i>14</i>
2.3.2	<i>BOS anvendt ved tetthets- og temperaturmålinger.....</i>	<i>16</i>
2.3.3	<i>BOS – metode brukt ved faseobjektets innflytelse på optiske lysstråler.</i>	<i>17</i>
3	EKSEMPLER PÅ BRUK AV: "BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN"-TEKNIKKEN.	21
3.1	BOS-VISUALISERING AV SUPERSONISKE STRØMMER VED SJOKKBØLGER I TUNNEL.	22
3.2	KVANTITATIV BOS-TEKNIKK FOR UTFORSKING AV STRØMVIRVLER VED FLY-VINGA I EN VINDTUNNEL.	24
3.3	BOS-TEKNIKKEN ANVENDT PÅ ET BK117 HELIKOPTER I LUFTA.	26
3.4	UNDERSØKELSE AV FØLSOMHET, NØYAKTIGHET OG OPPLØSNING MED BOS.....	28
3.5	LASERPÅVIRKET STRØMSTRUKTUR MED MÅLINGER FOKUSERT PÅ TID.	28
3.6	BOS-TEKNIKK ANVENDT VED UNDERSØKELSE AV TRANSONISKE TURBINBLAD.....	31
3.7	BOS-VISUALISERING AV MARANGONI EFFEKTEN PÅ MIKROSTRUKTURPLATER	32
3.8	VISUALISERING MED BOS- FOTOGRAFERING, TETTHETSENDINGER OPPSTÅTT VED LEKKASJE, FORBRENNING, VARMEOVERGANG OG SJOKKBØLGER.	34
3.8.1	<i>Lekkasje/Utslipp.....</i>	<i>34</i>
3.8.1.1	<i>Kryogeniske gasser.....</i>	<i>36</i>
3.8.2	<i>Forbrenning</i>	<i>36</i>
3.8.3	<i>Varmeovergang</i>	<i>37</i>
3.8.4	<i>Varmeovergang i organisk glass.....</i>	<i>38</i>
3.8.5	<i>Sjokkbølger.....</i>	<i>39</i>
3.8.5.1	<i>Bildebehandling av sjokkbølger med BOS</i>	<i>40</i>
4	FORSØK MED HØYHASTIGHETSKAMERA.....	42
4.1	VÅR INTENSJON MED FORSØKENE.	42
4.2	BILDE OG BESKRIVELSE AV FORSØKSOPPSETTET	43
4.3	FORSØKENE FRA 26.09.06, 10.10.06, 20.11.06 OG 22.01.07.....	45
4.3.1	<i>Forsøk fra 26.09.06 med stillbilder og film.....</i>	<i>45</i>
4.3.1.1	<i>Test 1 – kun et stillbilde.....</i>	<i>45</i>
4.3.1.2	<i>Test 2 – flammen tent, kun stillbilder.</i>	<i>45</i>
4.3.1.3	<i>Test 3 – fortsatt bare stillbilder.</i>	<i>46</i>
4.3.1.4	<i>Test 4 – stearinlyset satt nær bakgrunn, kamera i samme posisjon.....</i>	<i>46</i>
4.3.1.5	<i>Test 5 – kamera og stearinlys i samme posisjon - 10 stillbilder tatt.....</i>	<i>46</i>
4.3.1.6	<i>Test 6 – se bakgrunnsendring med bilde uten flamme.....</i>	<i>47</i>
4.3.1.7	<i>Test 7 – tatt AVI-film, med flamme på, test også visualisert vha Matlab.....</i>	<i>47</i>

4.3.1.8	Test 8 – tatt ny AVI - film, men uten flamme.....	48
4.3.2	<i>Forsøk fra 10.10.06 – m/optimalisering.....</i>	<i>50</i>
4.3.2.1	Test 1 – linsen kalibrert med fokus på vegg ca. 3 meter unna.	50
4.3.2.2	Test 2 – samme fokus, bildefrekvens ble endret.	51
4.3.2.3	Test 3 – samme opplegg, men eksponeringstid endret.....	51
4.3.2.4	Test 4 – Matlab-visualisert – fokus justert til mellom 3 og 1,5 meters avstand.	52
4.3.2.5	Test 5 – bildefrekvens og eksponeringstid endret.	53
4.3.2.6	Test 6 – kamera nær bordet m/lyset, fokus 1,4-1,3 meters avstand til bakgrunn.	53
4.3.2.6.1	<i>Beregninger av optimale verdier ved forsøket fra 10.10.06.....</i>	<i>55</i>
4.3.3	<i>Nye forsøk med stearinlys fra 20.11.06.....</i>	<i>58</i>
4.3.3.1	Test 1 – Visualisert vha Matlab.	58
4.3.3.2	Test 2 – lyskilde 1,5 meter unna, visualisering i Matlab.....	58
4.3.3.3	Test 3 – linsa konfigurert for 3 meters avstand til fokuseringspunktet.	59
4.3.3.3.1	<i>Beregning av optimale verdier fra forsøket 20.11.06.....</i>	<i>59</i>
4.3.4	<i>Forsøk fra 22.01.07.....</i>	<i>62</i>
4.3.4.1	Test 1 – Ingen tydelig forskyvning.....	62
4.3.4.2	Test 2 – Ingen tydelig forskyvning.	63
4.3.4.3	Test 3 – Ingen tydelig forskyvning.	63
4.3.4.4	Test 4 – Svak varmebølge.....	63
4.3.4.5	Test 5 – Observerte ingen varmebølger.	64
4.3.4.6	Test 6 – Svak varmebølge observert.	64
4.3.4.7	Test 7 – Svak varmebølge kunne observeres.	65
4.3.4.8	Test 8 – Ingen tydelige varmebølger ble observert.	65
4.3.4.8.1	<i>Beregning av optimale verdier fra forsøket 22.01.07.....</i>	<i>65</i>
4.4	VURDERING AV FORSØKENE I KAP. 4.3.	67

5 EKSPERIMENTER MED SPREDNING OG ANTENNING AV HYDROGEN VISUALISERT VED BOS FOTOGRAFERING.....68

5.1	OPPSETTET FOR EKSPERIMENTET DEN 16.02.07.....	68
5.2	FORSØKET MED HYDROGEN FRA 16.02.07.....	70
5.2.1	<i>Test 1 – Varmebølger og shadowgraph kunne observeres.....</i>	<i>70</i>
5.2.2	<i>Test 2 – Varmebølger observert.....</i>	<i>71</i>
5.2.3	<i>Test 3 – Varmebølger med virveldannelse.</i>	<i>72</i>
5.2.4	<i>Test 4 – Tynn laminær strøm.....</i>	<i>73</i>
5.2.5	<i>Test 5 – Varmebølger observert.....</i>	<i>73</i>
5.2.6	<i>Test 6 – Svakere visualisering enn test 5.....</i>	<i>74</i>
5.2.7	<i>Test 7- Bølgebevegelse, men med virvler.</i>	<i>75</i>
5.2.8	<i>Test 8 – Tynn laminær varmebølge.</i>	<i>75</i>
5.2.9	<i>Test 9 – Utydelig visualisering.</i>	<i>76</i>
5.2.10	<i>Test 10 – Tynn varmebølge i bevegelse.</i>	<i>76</i>

5.2.11	<i>Test 11 – Antydning til mer bevegelse.</i>	77
5.2.12	<i>Test 12 – Utydelig, så ingen bevegelse.</i>	77
5.2.13	<i>Test 13 – Ingen bevegelse.</i>	77
5.2.14	<i>Beregning av optimale forhold ved forsøket den 16.02.07</i>	78
5.2.15	<i>Beregning av massestrøm fra forsøket med hydrogen den 16.02.07</i>	79
5.2.16	<i>Oppsummering av forsøket fra 16.02.07</i>	80
6	OPTIMALE FORHOLD FOR BOS-FOTOGRAFERING	82
7	FEILKILDER	83
8	FORSLAG TIL VIDERE ARBEID	85
9	KONKLUSJON	86
10	REFERANSELISTE	87
11	VEDLEGGSLISTE	89

1 INNLEDNING

I senere tid er hydrogen blitt regnet som et godt alternativ til fossile drivstoffer. Det kan produseres elektrisk ved elektrolyse av vann, eller fra olje eller gass, og kan potensielt dekke alle energibehov.

På de fleste bruksområder (transport, oppvarming, produksjon av elektrisitet) er hydrogen svært egnet fordi det gir store miljømessige fordeler. Ved forbrenning består utslipp for det meste av vann og noe NO_x, mens hydrogen i en brenselcelle gir kun vann som biprodukt. Et annet viktig aspekt er at hydrogen er en fornybar ressurs.

Fordi hydrogen antennes lett, og fordi det ikke inneholder karbon, kan det brukes sammen med andre drivstoffer for å sørge for bedre tenning, eller for å redusere innhold av karbon i blandingen. Men fordi den krever lite energi for å tenne, medfører det at man må ta strenge forholdsregler ved oppbevaring og ved transport av hydrogen.

Flere organisasjoner og prosjekter er blitt etablert for å utforske muligheter for bedring av sikkerhet rundt bruk av hydrogen. HySafe er et slikt foretak, som er beregnet å være et samarbeid mellom forskningsorganisasjoner, industri, universiteter og offentlige departementer. Hensikten er å implementere en gradvis overgang til bruk av hydrogen som energibærer og utbedring av relatert teknologi.

Hydrogen Implementing Agreement (HIA) er en annen avtale som er utarbeidet av International Energy Agency (IEA) for å fremme internasjonalt samarbeid ved forskning og ved utvikling av hydrogenteknologi. Gjennom 20 forskjellige oppdrag ("tasks") har mange studier blitt gjennomført, hvorav dette prosjektet er knyttet opp mot Task 19, som omhandler hydrogensikkerhet.

I tilknytning til disse oppdragene har Avdeling for Teknologiske Fag på Høgskolen i Telemark blitt tildelt et fireårig program, som fokuserer på potensiell miljøvennlig bruk av hydrogen som energibærer, et såkalt strategisk høgskoleprogram (SHP). Som en del av dette er prosjektet HyNor Grenland.

HyNor Grenland går ut på å bygge en hydrogenfylllestasjon i Porsgrunn med den hensikt å bedre forstå hva som må gjøres ved eventuelle hydrogenutslipp og hvordan man legger opp sikkerheten på området.

Oppgaven som omtales i denne rapporten går ut på å finne ut hvordan eventuelle utslipp av hydrogen kan måles mer effektivt. Denne rapporten går så inn som en del av en rekke studier som er blitt gjort for å bedre forståelsen for hva man må gjøre for å øke sikkerheten ved bruk av hydrogen som drivstoff i transportsektoren.

Til dette formål er det blitt gjort eksperimenter med høyhastighetskamera og teknikken "Background Oriented Schlieren"- fotografering både ved sjokk, flammer og spredning, for å se hvordan gass-strømmene utvikler seg i prosessen.

I tillegg til et høyhastighetskamera og en ekstern lyskilde, er det blitt brukt diverse mønstre i bakgrunnen som lettere illustrerte forskjellene mellom lys som blir reflektert og lys som blir deflektert. De ulike mønstrene hadde forskjellig størrelse, for å kunne se hvilke som ga optimale visualiseringer.

Individuelle bilder som ble tatt under eksperimentene, ble sammenliknet med stillbilder hvor det ikke var gass-strømning. Dermed kunne tettheten i gassen beregnes ut fra endringene som ble observert i bakgrunnen, som følge av varmebølgene foran kamera og deres defleksjon av passerende lysstråler. For å få fram endringene under hvert utslipp mer tydelig, ble det tatt opp i mot 50 individuelle bilder per eksperiment.

I tillegg til fysiske eksperimenter, er det blitt utført simuleringer med programmet MATLAB, basert på måleresultatene. MATLAB er et program for numeriske beregninger og plott eller visualisering av data. Det er spesielt egnet for matematiske beregninger og kan isolere data som omhandler tetthetsgradienter fra hver film. Dette har som formål å framheve massen til forbrenningsgassene fra andre komponenter i bildet, slik at man får mulighet til å studere endringene i massen.

Første del av rapporten er en litteraturstudie hvor eventuelle. anvendelsesområder blir diskutert, og hvor eksempler på utgitt litteratur om emnet er blitt samlet, oversatt og vurdert.

Andre del tar for seg visualisering av tetthetsendringer forårsaket av lekkasjer, forbrenning, varmeovergang og sjokkbølger.

I tredje del samles forsøkene som er utført. Her blir resultatene gjennomgått, analysert og diskutert.

2 STUDIE AV "BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN" (BOS) FOTOGRAFERING

2.1 Schlieren fotografering

Bakgrunn for Schlieren-fotografering kan leses på Wikipedia:

"Schlieren ble først observert av Robert Hooke i 1665 under et eksperiment hvor han brukte en stor konveks linse og to lys. Det ene lyset ble brukt som lyskilde, mens det andre lyset ble observert å lage "Schlieren" effekt når den varme luften fra flammen steg opp. *Hooke, (1665)*.

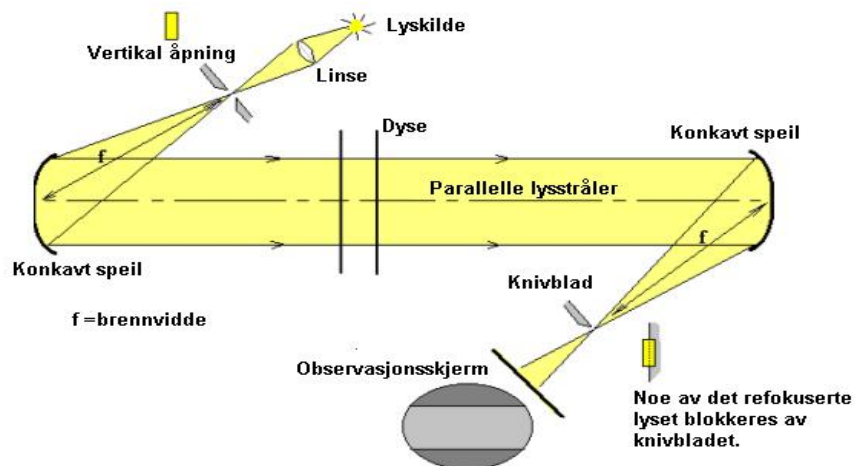
Det konvensjonelle Schlieren-systemet kan tilskrives August Toepler. Hans system gikk ut på å finne "Schlieren" effekten ved hjelp av glass brukt i linser. Systemet brukte en punktkilde til å lyse opp testområdet som inneholdt "Schlieren". *Toepler, (1864)*.

Ved å bruke en konvergerende linse, også kjent som Schlieren-linse, formes det et bilde ut fra dette lyset, og er definert ut fra linselikningen:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

Her er f definert som den fokale lengden (brennvidden) til linsen, d_o er avstanden fra objektet til linsen, mens d_i er avstanden fra objektets bilde til linsen."

2.1.1 Optisk mønster uten og med forstyrrelser.

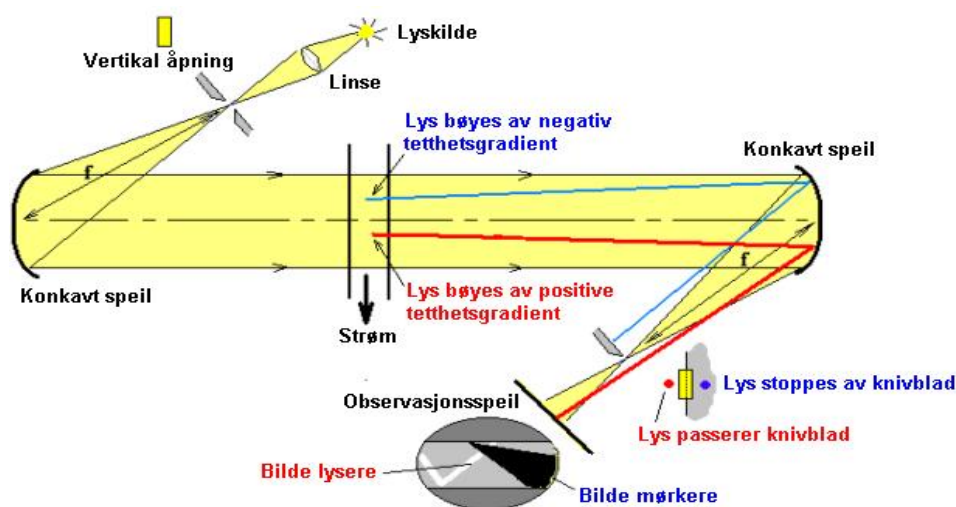


Figur 2-1a Optisk mønster uten forstyrrelser - Wikipedia - aeromech-ssflow3.

I et knivblad schlieren system, som var utstyrt med to konkave speil, ble lysstrålene fra en lyskilde sendt gjennom linsen og de to konkave speilene. Først for å få strålene til å gå i parallelle baner, dernest for å få dem til å fremstå på observasjonsskjermen i de posisjonene de hadde når de passerte linsen, minus de stråler som ble blokkert av knivbladet.

Ved å studere forskjellene mellom bildet hvor dysen er lukket og bildet hvor dysen er åpen, kunne tetthetsgradientenes posisjon beregnes. Figur 2-1a viser et optisk mønster som viser uforandret status på systemet.

Figur 2-1b viser optisk mønster med forstyrrelser, for eksempel sjokkbølger eller ekspansjonsbølger. Dette vil forårsake tetthetsgradienter i området som bøyer av lysstråler.



Figur 2-1b Optisk mønster med forstyrrelser - Wikipedia - aeromech-ssflow3

Mellom de to speilene er det en dyse. Når denne er åpen, vil partiklene fra gassen som slipper ut, bøye noe av lyset, som igjen fører til at strålene blir fokusert annerledes. Noen områder på observasjonsskjermen vil da framstå som lysere, da flere stråler havner i ett felt, mens andre steder blir mørkere, fordi flere stråler treffer knivbladet og blokkeres.

2.2 BOS-fotografering

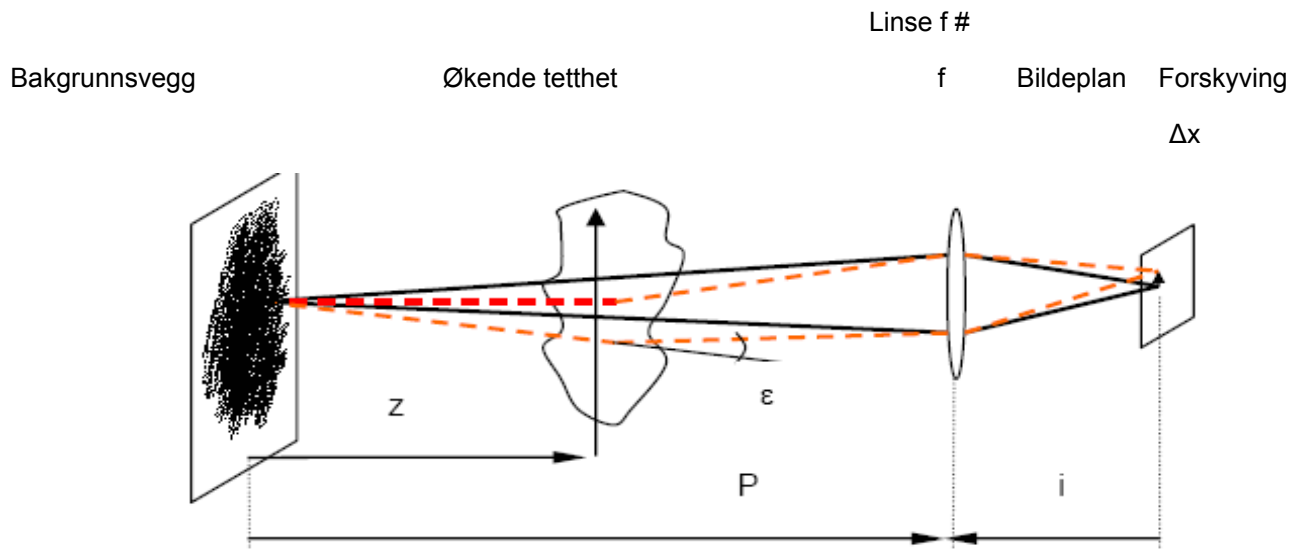
En videre utvikling av tradisjonell Schlieren er Background Oriented Schlieren (BOS)– fotografering, som det settes fokus på i dette arbeidet.

Metoden går ut på å måle vinkelen til lys som bøyes av når det passerer igjennom deler av luft med forskjellig tetthet, for eksempel gjennom forbrenningsgasser i luft. Bakgrunn til et bilde av lys som er bøyd av blir sammenliknet med bakgrunn på et bilde hvor det ikke er utslipp av gass. Dermed kan en måle tetthetsgradienten til en todimensjonal strøm av gass foran kamera og finne ut tettheten på gassen. Med en visualisering av resultatene kan oppførselen til gass-strømmen studeres, og brukes til å beregne og forutse hvordan utslippet i realiteten utvikler seg.

2.3 BOS-prinsipp

Richard et al. (2000) mener BOS-teknikken tåler sammenligningen med andre optiske systemer meget bra. Dessuten er det lettere, i motsetning til laserbasert teknikk, å studere avhengigheten av Reynolds tall i utviklingen i gass-/væske-strøm. Reynolds tall er forholdet mellom inerte krefter ($v_s \rho$) og viskøse krefter (μ/L), og blir brukt for å bestemme om en strøm er laminær eller turbulent. Det oppstår en laminær strøm ved lavt Reynolds tall, da er det de viskøse kreftene som er dominerende og kan karakteriseres ved en jevn konstant strømbevegelse. Ved turbulent strøm oppstår det et høyt Reynolds tall og da er det de inerte kreftene som er dominerende og produserer uregelmessige rotasjoner, virvler og annen strømbølgegang.

Venkatakrishnan et al. (2004) hevder at et oppsett for BOS målinger behøver bare et enkelt kamera som er fokusert på en bakgrunn som normalt består av et papir med en tilfeldig spredning av punktmønster. Se figur 2-2. Størrelsen på mønsteret bør være konfigurert slik at forstørrelsen fører til at en prikk opptar 2-3 piksler på CCD chipen.



Figur 2-2 Et enkelt oppsett for BOS-målinger Venkatakrishnan et al. (2004)

Her er:

z = avstand mellom bakgrunn og tetthetsobjektet

i = avstand mellom linse og bildeplanet

P = avstand mellom bakgrunn og linse

i = avstand mellom linse og bildeplanet

f representerer brennvidden

$f \#$ representerer blenderåpning

Venkatakrishnan et al. (2004) mener at minst to bilder bør være lagret ved hvert forsøk: Et referanse-bilde uten noen forstyrrelser foran mønsteret, og et bilde hvor tetthetseffekten er observert. Uten forstyrrende strømninger, vil lyset gå i en rett strekning mellom mønsteret og kamera, og deretter vil referansebildet vises. Med tetthetseffekten foran kamera, vil lysstrålene avvike fra den rette linjen med vinkel ϵ og bilde av bakgrunsmønsteret vil vises i en annen posisjon når de to bildene sammenliknes.

Skal man beregne vinkel ϵ brukes følgende.:

$$\epsilon = \frac{-dh}{Z_D}$$

h er dimensjonen på en piksel i bakgrunnsplanet. Z_D er den parallelle avstanden til den optiske linjen mellom bakgrunnen og skjæringspunktet mellom lysstråler som blir forstyrret og de som ikke blir forstyrret.

2.3.1 Et typisk BOS-oppsett for optimalisert oppløsning.

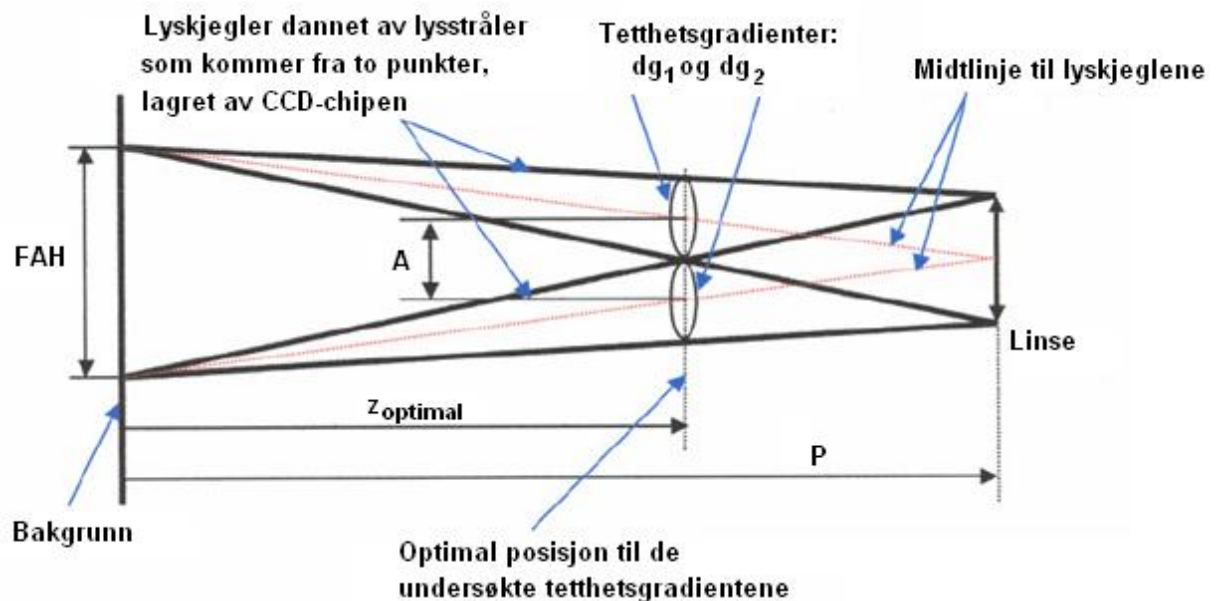
Klinge et al. (2003) beskriver at optimal resolusjon A er gitt hvis følgende betingelser under forsøket blir fulgt:

To tetthetsgradienter, (kalt dg_1 og dg_2), utpekes hvis z , (avstand mellom bakgrunn og tetthetsgradienten), blir valgt slik at de to lyskjeglene som kommer fra to merketete punkter i bakgrunn med avstand FAH til hverandre, bare berører seg selv.

Posisjonen hvor denne betingelsen passer, betegnes som z_{optimal} og garanterer den beste oppløsningen i forsøket. Et typisk BOS oppsett som er optimalisert for oppløsning, vises i figur 2-3

Hvis z er mindre enn z_{optimal} , så inneholder ett enkelt forsøksområde informasjon om flere tetthetsgradienter som ikke kan avsløres med krysskorrelasjon *Klinge et al. (2003)*.

Hvis z er større enn z_{optimal} , så kan to nabo-områder inneholde samme informasjon om tetthetsgradientene. I begge situasjoner er det mindre informasjon tilgjengelig sammenliknet med det optimale forholdet hvor $z = z_{\text{optimal}}$.



Figur 2-3 Et typisk BOS-oppsett for optimalisert oppløsning. *Klinge et al. (2003)*

Ved å bruke denne betingelsen for A og normalisere z ved bruk av $e = z / P$, kan e beskrives ved følgende forhold:

$$e_{optimal} = \frac{FAH}{\frac{f}{f_{\#}} + FAH} \quad \text{Klinge et al. (2003)}$$

FAH er avstanden mellom de to punktene i det fokuserte bakgrunnsfeltet, f er brennvidden og $f_{\#}$ representerer blenderåpningen. Ved å bruke $e_{optimal}$, kan oppløsning A beregnes som følger:

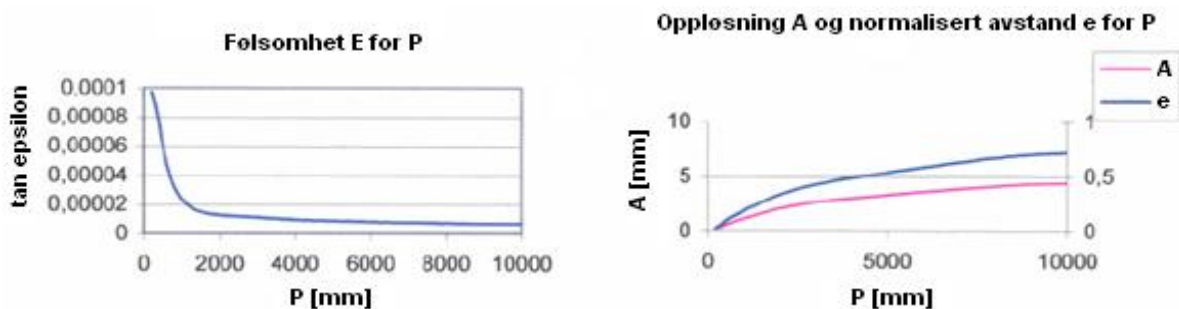
$$A = e_{optimal} * \frac{f}{f_{\#}} \quad \text{Klinge et al. (2003)}$$

Følsomheten E til et oppsett kan bestemmes ved å beregne den minste observerbare avviksvinkel, $\tan(\epsilon)$. Hvis den minste observerbare forskyvning er på rundt 0.1 piksel, så kan $\tan(\epsilon)$ bestemmes ved følgende:

$$E = \tan \epsilon_{\min imal} = \frac{0.1 * PGK}{M * e * P} \quad \text{Klinge et al. (2003)}$$

PGK er den fysiske størrelsen på en piksel på CCD-chipen (gjelder for dynamiske lysspredningsdata). M er betegnelse for forstørrelsesfaktor i det optiske system. P er avstand mellom linsa og bakgrunnen. e er avstand mellom objektet og bakgrunn dividert på avstand mellom bakgrunn og linsa.

For gitte parametere kan systemets oppløsning A og følsomhet E bestemmes ved å studere følgende graf (se figur 2-4). Ønsket oppløsning og følsomhet for BOS-oppsettet kan oppnås ved å variere brennvidden, blenderåpningen $f_{\#}$ og ved å tilpasse avstand z .

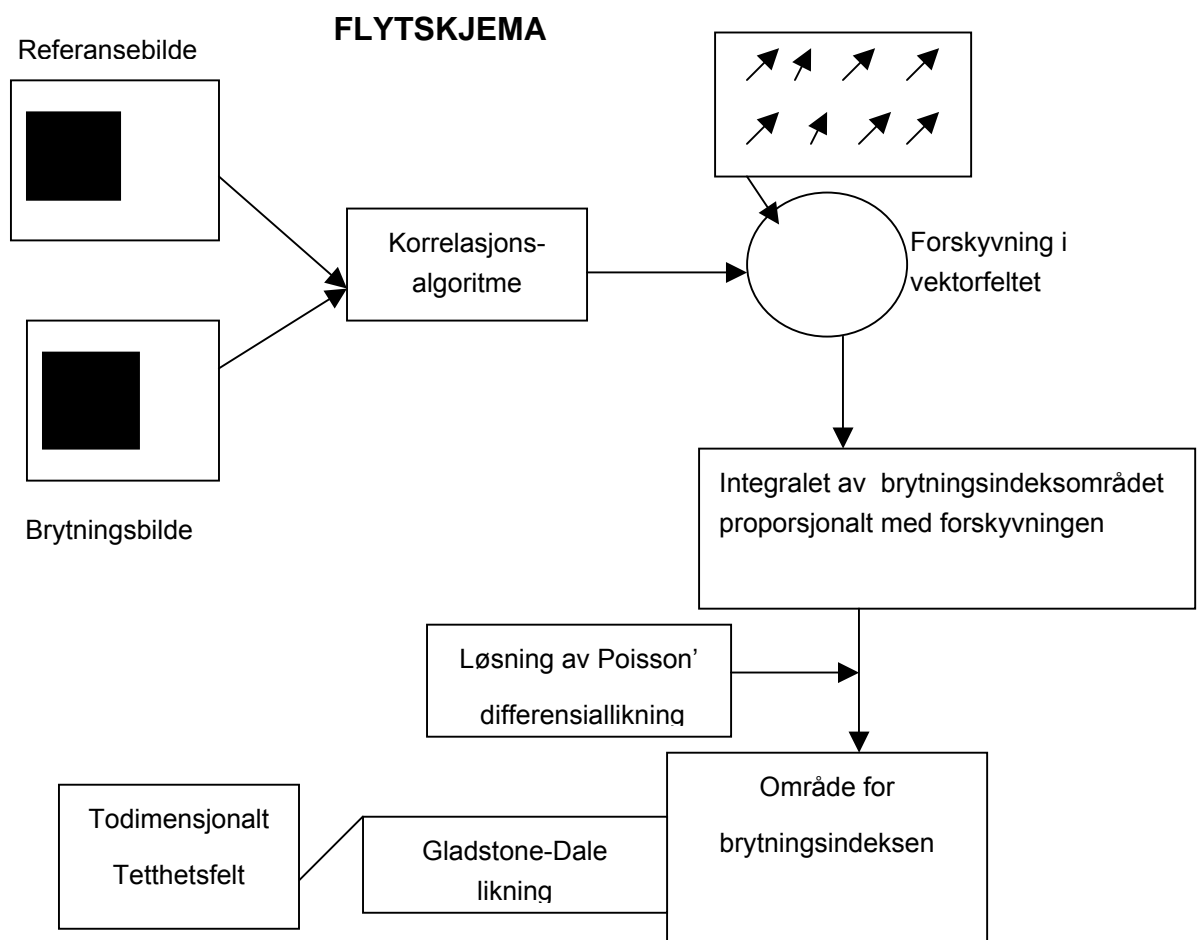


Figur 2-4 Sammenheng mellom følsomhet og oppløsning i et BOS-oppsett. Klinge et al. (2003)

2.3.2 BOS anvendt ved tetthets- og temperaturmålinger.

Vasudeva *et al.* (2005) har gjort en observasjon vedrørende tetthetsfordelingen i et ikke-homogent objekt, og er beskrevet og lagt frem under en australsk konferanse i 2005. Metoden som er av BOS-karakter er ganske enkel, men effektiv. Det gjelder å formidle kvantitativ informasjon om tetthetsfelt skalert over et stort område, noe som ofte støtes på i industrielle sammenhenger. Bildebehandlingen fra input til output sees i flytskjemaet i figur 2-5.

Stråledefleksjonen ved de ulike punkter blir brukt til å rekonstruere brytningsindeks og tetthetsfordeling. Når brytningsindeksfeltet er funnet, så kan teknikken brukes til å måle relaterte egenskaper, slik som temperatur, trykk og gassens oppbygning.



Figur 2-5 Flytskjema for tetthet-/ temperaturmålinger med BOS-fotografering

Gladstone-Dale likningen gir oss en forbindelse mellom brytningsindeksen til et objekt og objektets tetthet. Dersom n representerer brytningsindeksen og indikerer fluidets tetthet i objektet, blir forbindelsen mellom dem gitt av:

$$n-1 = K * \rho, \text{ hvor } K \text{ er Dale-Gladstone konstanten.}$$

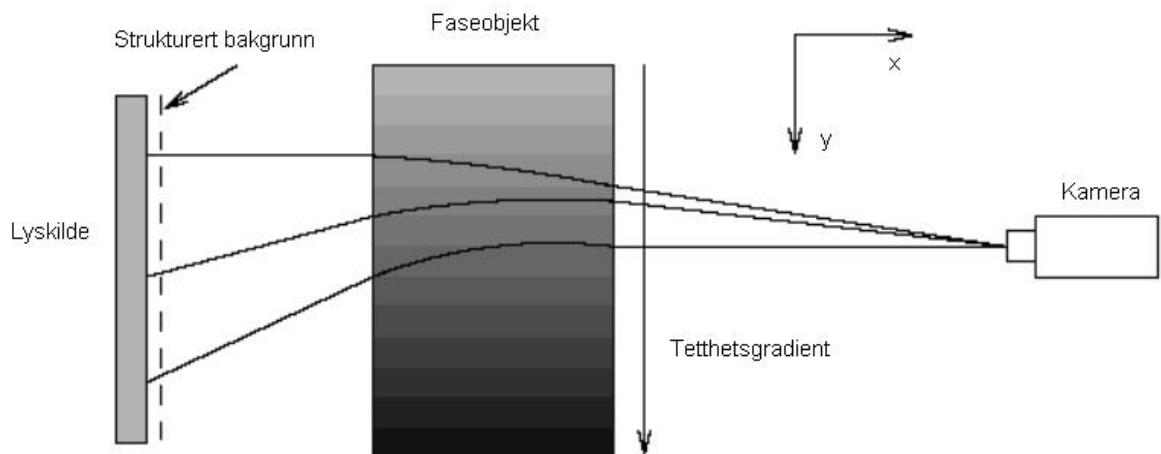
Dale-Gladstone konstanten avhenger av gassens karakteristikk i objektet og noe av lysets frekvens.

2.3.3 BOS – metode brukt ved faseobjektets innflytelse på optiske lysstråler.

Jensen, (2003) beskriver et faseobjekt som et ikke-homogent objekt.

Når et faseobjekt er plassert mellom bakgrunnen og kameraet, som i figur 2-6, fremstilles bildene slik at bilde nummer 1 utgjør et referansebilde, mens bilde nummer 2 fordreies på grunn av faseobjektet. Faseobjektet kan for eksempel være en varmekilde som endrer temperatur og tetthet på gassen som fotograferes i forsøket.

En trenger ikke å ta referansebildet og bilde nummer 2 rett etter hverandre. De kan fotografers med korte mellomrom, bare ikke oppsettet endres, (kamera eller motiv må ikke flyttes). Dette er meget viktig, fordi endringene fra bilde til bilde er ofte svært små og forstyrrelsene øker hvis oppsettet endres.



Figur 2-6 Faseobjekt plassert mellom bakgrunn og kamera. For å beregne tetthetsgradienten anvendes : $\delta\rho/\delta x = 0$ og $\delta\rho/\delta y > 0$ - *Jensen, (2003)*

Ved å sammenlikne de to bildene, kan det dannes et felt bestående av forskyvningsvektorer i prøveområdet. *Jensen, (2003)* mener dette vektorfeltet representerer tetthetsgradienten til brytningsindeksen, og ut fra dette kan brytningsindeksen $n(x; y)$ beregnes. En måte å beregne indeksen på er å løse Poissonlikningen i diskret form. En annen metode er å løse $n(x; y)$ direkte fra det målte feltet $n(x; y)$.

Den beregnede brytningsindeksen $n(x; y)$, benytter Gladstone-Dale-likningen og deretter likning (A-01):

(A-01)

$$T(x, y) = \frac{1}{c_1 \cdot n(x, y) + c_2} \quad \text{Jensen, (2003)}$$

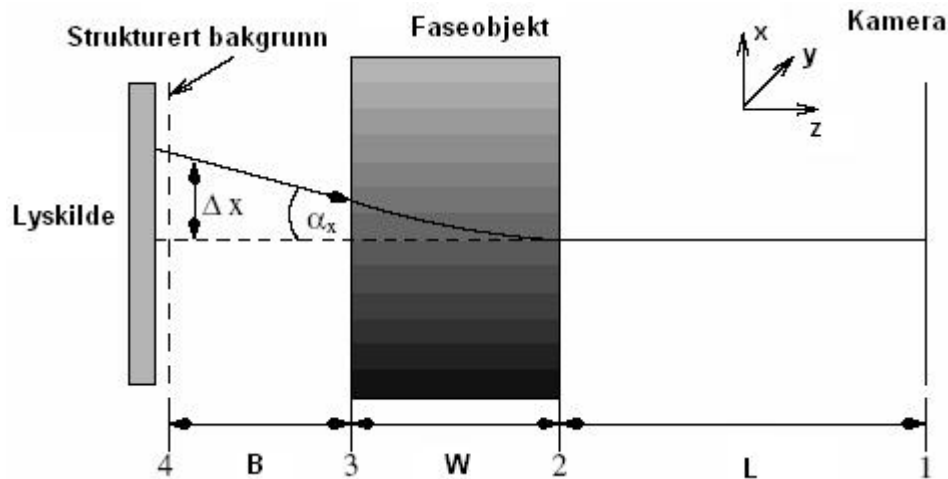
c_1 og c_2 er to ukjente konstanter som må bestemmes ved ekstra temperaturmålinger.

Jensen, (2003) beskriver videre i sin rapport at avstanden mellom bildene i bakgrunns mønsteret har fått betegnelsen Δx , og er forårsaket av tetthetsgradientene. (Se figur 2-7) Forskyvningen av mønsteret kan påvises ved å benytte standard korrelasjonsalgoritmer. Disse er utviklet for "Particle Image Velocimetry" (PIV) målinger, men er også svært egnet til bruk ved BOS-fotografering.

Jensen, (2003) sier videre at i et faseobjekt forandres lyslengden i objektet. Lyset kan komme ut i motsatt fase av hvor det gikk inn. Hvorvidt lysstrålene kommer igjennom fasen eller ikke avhenger av objektets dimensjoner. Lys som brytes i ulik grad blir forsinket og virker mørkere som følge av negativ interferens.

Jensen, (2003) så at kontraster kan oppstå fordi lys kan interferere. Hvis en lysstråle forsinkes med en halv bølgelengde forsvinner lyset. Når lysstrålene passerer objektet blir hastigheten deres påvirket av de fysiske egenskapene til objektet. Strålene bøyer av og fasen endres når strålene passerer gjennom de ulike felt. De strålene som går igjennom objektet er ute av fase i forhold til de som går utenom.

Lysstrålen fra bildeplanet til den mønstrede bakgrunnen resulterer i avvik som er $\Delta x_{1,2} = \Delta y_{1,2} = 0$ mellom posisjon 1 og 2. Se figur 2-7.



Figur 2-7 Skisse som viser faseobjektets innflytelse på lysstråler. Den stiplede linjen viser banen til strålene når faseobjektet ikke er tilstede - Jensen, (2003).

Jensen, (2003) mener årsaken til dette avviket er at bare lys som er parallelt til z-aksen er fanget inn av kameraet, dette som følge av det optiske oppsettet, selv om den konstante brytningsindeksen er mellom posisjon 1 og 2.

Innenfor faseobjektet, mellom posisjon 2 og 3, kan lysets brytning bli beregnet ved integreringslikningen (A-02):

(A-02)

$$\tan \alpha_x = \frac{dx}{dz} = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz$$

$$\tan \alpha_y = \frac{dy}{dz} = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz.$$

Jensen, (2003)

Lysets defleksjonsvinkler er α_x og α_y .

En antar at brytningsfeltet varierer bare i x- og y-retningen, resultatene får en av likning (A-03):

(A-03)

$$\Delta x_{2,3} = \int_2^3 \left[\int_2^3 \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz \right] dz = \frac{1}{2} W^2 \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\Delta y_{2,3} = \int_2^3 \left[\int_2^3 \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz \right] dz = \frac{1}{2} W^2 \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y}$$

Jensen, (2003)

Betegnelsen n_0 , som er den nominelle brytningsindeksen, kan brukes her fordi forskjellen mellom brytningsindeks n og n_0 er antatt å være liten.

Avviket mellom posisjon 3 og 4 avhenger bare av lysets vinkel da det forlater faseobjektet ved posisjon 3 og er bestemt ved $B \cdot \tan \alpha$. Med grunnlag i likning (A-02) får man da likning (A-04):

(A-04)

$$\Delta x_{3,4} = B \tan \alpha_x = B \int_2^3 \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x} dz = B \cdot W \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\Delta y_{3,4} = B \tan \alpha_y = B \int_2^3 \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y} dz = B \cdot W \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y}$$

Jensen, (2003)

Den totale lysavbøyningen mellom frontbilde og bakgrunnsbilde får man ved likning (A-05):

(A-05)

$$\Delta x = \Delta x_{2,3} + \Delta x_{3,4} = \frac{1}{2} W (W + 2B) \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\Delta y = \Delta y_{2,3} + \Delta y_{3,4} = \frac{1}{2} W (W + 2B) \frac{1}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y}$$

Jensen, (2003)

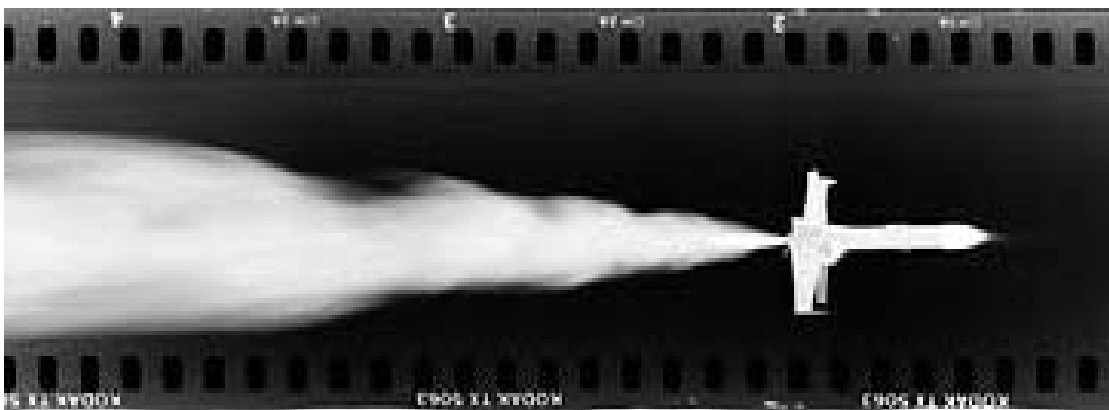
Dette avviket kan så bli numerisk bearbeidet slik at størrelsen på brytningsindeks- og temperaturfeltet blir funnet.

3 EKSEMPLER PÅ BRUK AV: "BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN"-TEKNIKKEN

BOS- teknikken har blitt et viktig hjelpemiddel for å kunne påvise årsaken til gass- og væskeutslipp ved branner, eksplosjoner og andre hendelser i industri, transport og luftfart. (Figur 3-1) Ved "NASA JSC White Sands Test Facility" er det anlagt et fem kvadratkilometer stort forsøksområde, hvor det blir gjennomført kontinuerlige tester for å se hva som skjer ved et utslipp eller en eksplosjon. Hvordan kan man begrense omfanget og spredningen av et eventuelt gassutslipp mot omgivelsene. Her kommer BOS- fotograferingen inn for det kan stadfeste og å vise hvordan utslippet oppsto. I tillegg kan man kan vise hvordan det utvikler seg og kan ta sine forholdsregler for å minske omfanget av en eventuell katastrofe (<http://www.wstf.nasa.gov>).

Det er spesielt stoffenes spredningsevne som fotograferes og måles. Temperaturer blir målt, og prøver tas i ulike høyder og omfang i utslippsområdet. I høyder opptil 18 meter over bakken blir vind og turbulens registrert og de lokale meteorologiske data rutinemessig innhentet. Stoffene som slippes ut, kan være flytende propan, flytende hydrogen, hydrogenfluorid og forskjellige drivstoffer. (<http://www.wstf.nasa.gov>)

Branner arrangeres i store basseng, hvor man på oppdrag fra industrien, gjør tester for å bedre kunnskapen om hva som skjer ved spredning av grafittfiber, sot, avgasser og intensiteten til varmestråling, så vel som avgassenes temperatur. Det brennbare stoffet som da testes er rakett- og flydrivstoff.



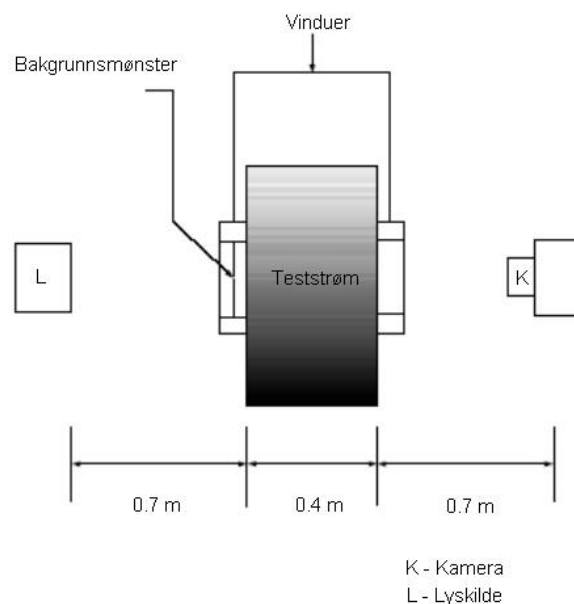
Figur 3-1 Synkron ballistisk fotografering med BOS teknikk (<http://www.wstf.nasa.gov>)

3.1 BOS-visualisering av supersoniske strømmer ved sjokkbølger i tunnel.

Mee et al. (2004) viste en presentasjon på BOS- teknikk til bruk ved visualisering av supersoniske, kompressible strømmer ved en konferanse i Sidney i 2004. Forsøkene som ble utført besto i å lage sjokkbølger i en tunnel med et objekt som var kjegleformet og som skrådde ca. 20 grader.

Det ble brukt et enkelt optisk oppsett, (se figur 3-2), som inneholdt et bakgrunnsmonster, et høyhastighetskamera og en lyskilde med høy intensitet. Bildene som ble tatt i løpet av forsøket ble sammenlignet med "Particle Image Velocimetry" (PIV)- teknikken.

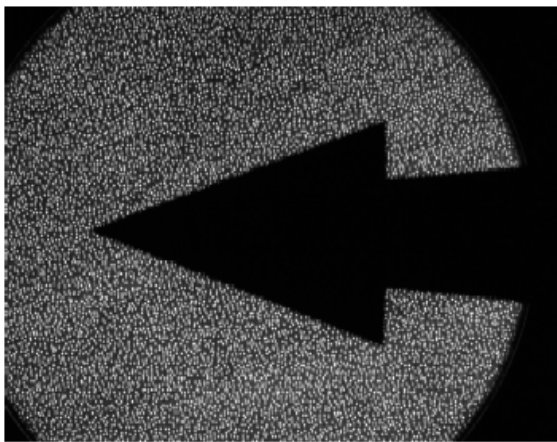
Mee et al. (2004) beskriver at lysintensiteten i hvert punkt av det bearbejdede bilde var proporsjonal med tettheten ved hvert punkt. Det ble oppnådd en kvalitativ visualisering av sjokkbølgene, med bilder som klart indikerte subsoniske og supersoniske strømmer. Resultatet for objektet ble bestemt ved teoretiske beregninger. Avstanden fra sjokkbølgen til objektet ble målt. Så ble grunnleggende BOS- prinsipp lagt til grunn for å visualisere tetthetsvariasjonene i de supersoniske strømmene.



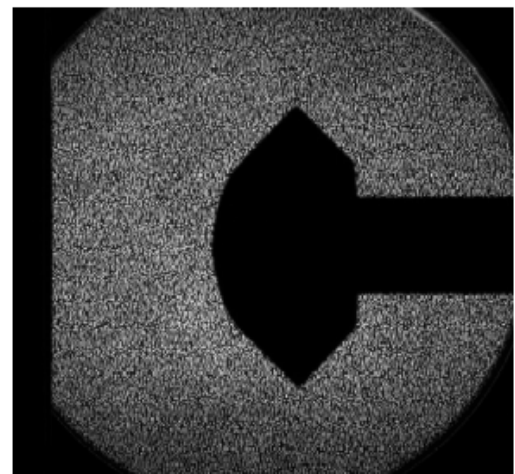
Figur 3-2 : Skjematisk BOS-oppsett fra rapport av Mee et al. (2004)

Mee et al. (2004) konkluderer med at de anvendte et sett med digitalbilder i bearbejdingsprosessen av de to bildene fra forsøkene. Matlab ble så benyttet til etterbehandling av bildene. Datastyrt bildebehandling er en av de viktigste fordelene ved å bruke BOS. Det reduserer tiden det tar å sammenligne bildene, både fotografisk og mekaniske behandling. Numeriske teknikker blir deretter brukt til analysering av bildene.

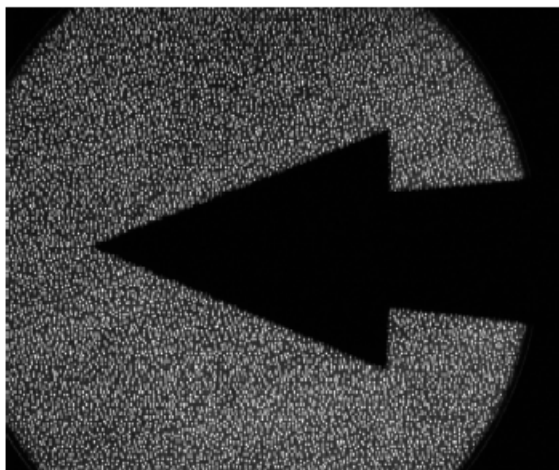
Referansebilde som man ser i figur 3-3 og 3-4 viser at det ene bilde er tatt når det var stillestående (statisk) strøm i strømningsfeltet, mens det andre bilde viser, (se figur 3-5 og 3-6), at det var tatt i perioden med laminær strøm i strømningsfeltet, og var tatt som input for en sammenligning av bildene.



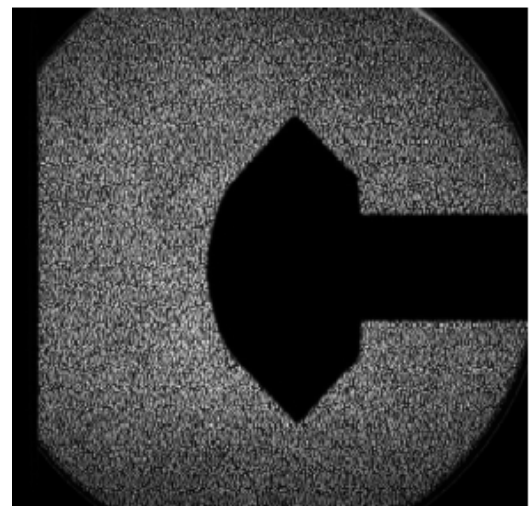
Figur 3-3 Ref.bilde ved stillestående strøm
Mee et al.(2004)



Figur 3-4 Ref.bilde ved stillestående strøm



Figur 3-5 Bilde med laminær strøm i strømningsfeltet
Mee et al. (2004)



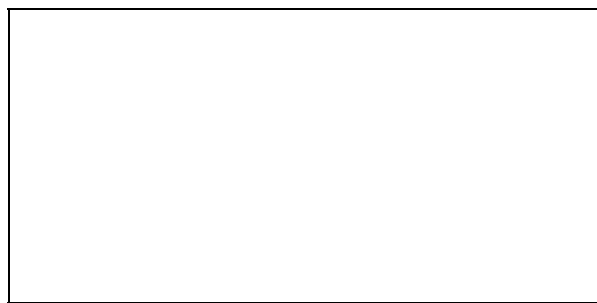
Figur 3-6 Bilde med laminær strøm i strømningsfeltet

Mee et al. (2004) beregnet så vinkler og avstander fra sjokkbølgen med ulike forutsetninger. Vinklene målt fra de bearbejdede bildene var innen 2% av de teoretiske beregningene og passet bra til resultatene fra CFD- simuleringene (CFD = Computational Fluid Dynamics).

Det videre arbeid vil nå bli å bestemme tetthetsfordelingen i strømningsfeltet kvantitativt, og dette kan bli oppnådd ved å utvikle en algoritme som kan bestemme tettheten ved de ulike felt i prosessbildet.

3.2 Kvantitativ BOS-teknikk for utforskning av strømvirvler ved fly-vinga i en vindtunnel.

Klinge et al. (2003) beskriver BOS målinger som lenge har vært i bruk i kombinasjon med "Particle Image Velocimetry" (PIV)- målinger, for å finne kvantitative strømningshastigheter og tetthetsdata i samband med strømvirvler rundt fly-vinge. (Figur 3-7)



Figur 3-7 Den sorte pila representerer retningen vinden har mot fly-vingen. Vinkel α er innfallsvinkelen. (Figur tegnet av Theresa Knott)

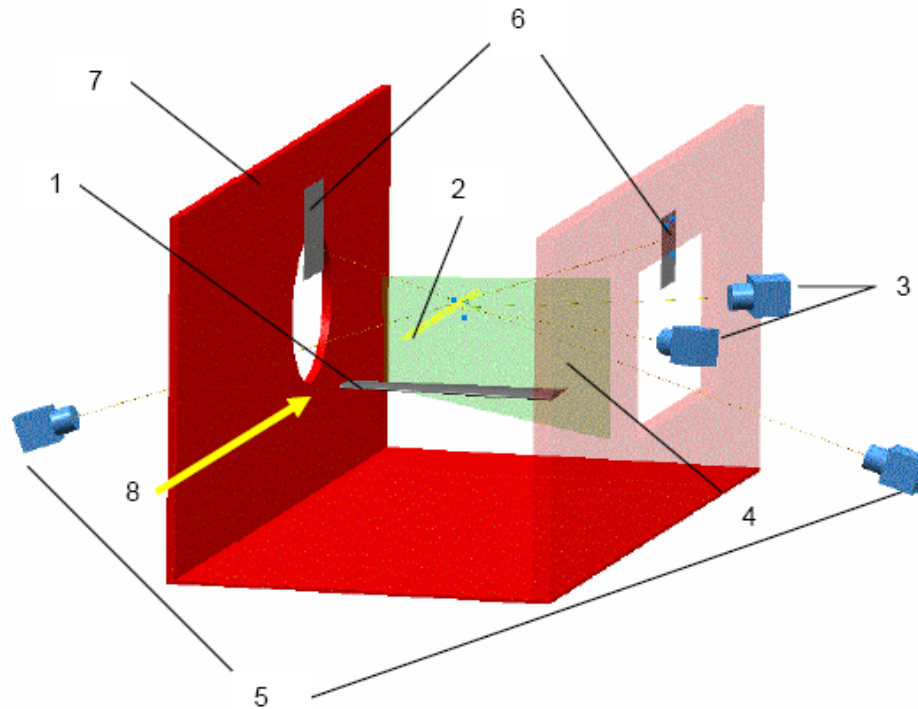
Klinge et al. (2003) anvendte en luftfoliemodell ved forsøket, denne skulle illustrere et stort, moderne transportfly. Forsøket fant sted i en transsonisk vindtunnel i Göttingen i Tyskland. Modellen hadde et vingspenn på 0,6 m og et vingereale på 0,1 m² og forsøket ble foretatt i et 1 x 1 m transsonisk testområde med ulike Mach nummer (Mach No. 0.5 / 0.6 / 0.7). (Se figur 3-8)

Selv om BOS- teknikken som målemetode fortsatt er under utvikling, er det mulig å foreta lokale, kvantitative tetthetsmålinger i todimensjonale strømninger.

Forsøket ble gjort for å bevise at BOS- metoden også kan brukes ved symmetriske strømmer med tredimensjonale akser i praktiske vindtunneltester.

Målingene for både BOS og PIV ble foretatt med fire digitalkameraer og en dobbelpulslaser Nd:YAG på 2 x 320 mJ.

Rapporten til *Klinge et al. (2003)* fokuserer på det teoretiske og det tekniske aspektet ved BOS- teknikken og på evalueringsmetodene rundt 3D-aksens symmetriske strømmer.



Figur 3-8 Forsøksoppsettet i vindtunnelen - *Klinge et al. (2003)*.

Her er:

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 1. Halvmodell av flyvinge | 5. Kameraer til BOS teknikk |
| 2. Strømvirvel rundt flyvinga | 6. Bakgrunner til BOS- teknikk |
| 3. Kameraer til PIV- teknikk | 7. Vindtunnelvegg |
| 4. Laserlysflate | 8. Strømningsretning |

Klinge et al. (2003) konkluderer med at posisjonen til strømvirvelen funnet med BOS- teknikk var den samme som ble oppdaget med PIV- teknikk. Når dette først ble kjent, så var det mulig å bestemme hvordan tettheten ble fordelt inne i strømvirvelen ved hjelp av ringmetoden som er følgende:

Brytningsindeksfeltet blir avgrenset av ringer (sirkler). En antagelse i forbindelse med denne metoden er at innen en ring eller sirkel er brytningsindeksen konstant.

I dette tilfelle er avviket til lysstrålen forårsaket av en enkel brytning, som er beskrevet i Snells lov i grenseområdet mellom ringene (sirklene).

Snells lov :

$$n \cdot \sin \Phi = n' \cdot \sin \Phi'$$

hvor:

Φ innfallsvinkel

Φ' overføringsvinkel

n brytningsindeks for ytre miljø

n' brytningsindeks for indre miljø

En sammensatt brytningsindeksfordeling, avviksvinkel for en lysstråle α og resultatet av summen av brytningsvinklene ved grenseflatene gir da:

$$\alpha_n = \sum_{i=1}^n \alpha_{n,i} \quad \text{Klinge et al. (2003)}$$

De sammenlagte resultatene viste hvordan symmetrisk tetthetsfordeling i 3D-akse kan undersøkes med BOS- teknikk.

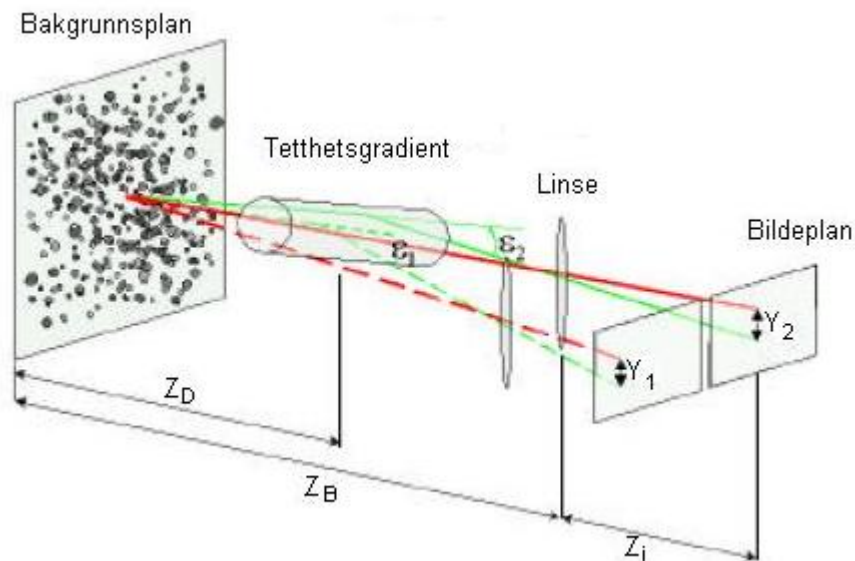
Klinge et al. (2003) mener det ikke er mulig å sammenlikne den evaluerte tetthetsfordeling, funnet med BOS- teknikk, med tetthetsfordeling funnet med PIV- teknikk, fordi PIV målingenes oppløsning ikke var tilstrekkelig i dette forsøket.

Selv om partikkelstørrelsen ble optimalisert med tanke på synlighet og treghet for transsoniske strømninger, så var kjernen i strømvirvelen gått i oppløsning. Grunnen til dette var høy sentrifugalkraft og høy tangentialhastighet.

3.3 BOS-teknikken anvendt på et BK117 helikopter i lufta.

Her har *Richard et al. (2004)* med BOS- teknikk gjort kvalitative og kvantitative undersøkelser av uregelmessige tetthetsfelt i høyhastighetsstrømmer, forbrenning og flytester i full skala. Det grunnleggende prinsipp kan kort beskrives at en utvider den tredimensjonale kvantitative teknikken til å ha flere kameraer til disposisjon under testene. Det kan i første omgang bygges ut med to kameraer som fungerer i et stereoskopisk mønster. Begge kameraene peker mot samme bakgrunn under forsøket. Se figur 3-9. Bakgrunnsbildemønsteret er ikke i samme posisjon i forhold til sensorplanet for hvert av kameraene.

Derfor kan de to bilderesultatene krysskorrelegeres med hverandre. Bilde fra det ene kameraet blir definert som en referanse til det andre bildet og vise versa *Richard et al. (2004)*.



Figur 3-9 Optisk bane med et BOS- oppsett med to kameraer *Richard et al. (2004)*.

Richard et al. (2004) mener denne teknikken er svært anvendelig for bevegelige objekter. I et helikopter som er i lufta, kan to eller flere kameraer lett installeres ombord. BOS- teknikken fungerer slik at det fokuseres på en fjern bakgrunn uten å bli hindret av rotorbladene. Det eneste man er avhengig av er å ha en tilstrekkelig god bildekontrast. Dermed har man muligheten for å visualisere strømvirvlene rundt rotorbladene til helikopteret.

Geometriske parametere som viser posisjonen til strømvirvlene, virvlenes akser og lignende informasjon kan innhentes med BOS- fotografering

De innhentet også data om tetthetsgradienter til tross for vanskelige eksperimentelle forhold. Disse bidro til å visualisere tetthetsfelt med ganske lovende arealoppløsning. Sammenlignet med tidligere målinger vil testtiden avta vesentlig fremover, så som oppsett av kameraer, det å motta og få tilgang til data.

Virvelaksens posisjon i rommet, kan ikke fås uten å endre retningen kameraet peker imot. Ved å bruke to kameraer i et stereoskopisk arrangement kan tetthetsfordelingen måles uten å måtte lage et gjennomsnitt av data fra forskjellige rotorsykluser. For å få mer komplette tredimensjonale data, må fremtidige undersøkelser gjøres med mer enn to kameraer.

Richard et al. (2004) viste ved sin demonstrasjon at konseptet er gjennomførbart for å løse et teknologisk - fluidmekanisk vanskelig problem.

3.4 Undersøkelse av følsomhet, nøyaktighet og oppløsning med BOS

Goldhahn et al. (2006) viser en karakterisering av isotermiske strømninger som trenger en termodynamisk tilstandsvariabel i tillegg til hastighetsfeltet. I dette arbeidet ble BOS- teknikk brukt sammen med en tomografisk rekonstruert algoritme for å bestemme 3D tetthetsfeltet til en kompleks 3D-strøm. Før målingene ble foretatt, ble graden av følsomhet, nøyaktighet og oppløsning utført med BOS.

Goldhahn et al. (2006) hevder at den synlige endringen i bakgrunns mønsteret som følge av lysbrytning i tetthetsfeltet, kan bestemmes med BOS. Ved å bruke de geometriske dimensjonene til BOS- oppsettet kan defleksjonsvinkelen (ϵ) beregnes. Den henger sammen med integralet til vinkelen ved brytningsindeks-gradientene. Dermed fører spørsmålet om følsomhet til et spørsmål om minste målbare integral.

Goldhahn et al. (2006) viser at følsomhet primært avhenger av fokuserings-avstanden, posisjonen til tetthetsobjektet mellom kamera og bakgrunn og til den minste målbare pikselforskyvning. Den omtrentlige lengde på oppsettet har kun mindre innflytelse.

Nøyaktigheten kan bli vurdert gjennom undersøkelse av det virtuelle 2D tetthetsfeltet til homogen luft som er stabilt med hensyn til varme. Området ble definert med både temperatursensorer og BOS målinger samtidig. Sammenlikning av resultatene viste stor enighet, selv for målinger med svært små verdier for tetthetsgradienten.

Goldhahn et al. (2006) konkluderer med at arbeidet som er gjort fram til nå, viser nøyaktighet, oppløsning og følsomhet ved bruk av BOS- teknikk og demonstrerer at metoden kan brukes for en kompleks 3D-strøm. For ustabile strømmer trengs det nye målinger gjort av flere kameraer samtidig.

3.5 Laserpåvirket strømstruktur med målinger fokusert på tid.

Kähler et al. (2003) hevder at kontroll av laminære og turbulente strømmer med dynamiske aktuatorer er av stor vitenskapelig og teknologisk interesse i et hvert område av fluidmekanikken. Rapporten stiller spørsmålstegn ved om det er mulig å skape kunstige strømstrukturer for å kunne undersøke deres egenskaper og betydning for turbulent miksing, eller for å se på deres adferd sammen med andre strømstrukturer.

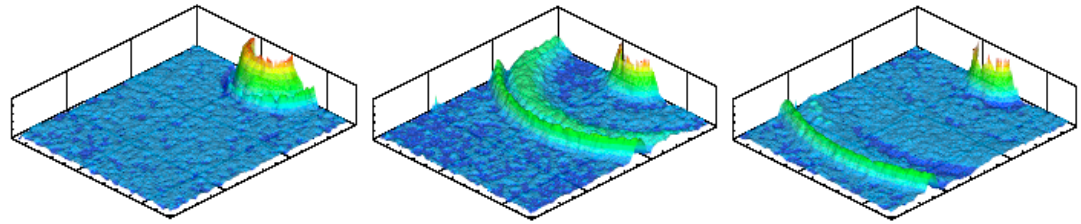
Kähler et al. (2003) mener at på grunn av strømstrukturens begrensede dynamiske rekkevidde, ser det ut som om potensialet er noe begrenset. Den tekniske implementeringen er også ganske vanskelig til tider. Det er foreslått et optisk aktuatorkonsept som vil kunne påvirke strømmen uten uønskede ettervirkninger ved nesten hver pulsbredde og repetisjonshastighet. De mener at bare støy grunnet tilfeldige korrelasjoner og uensartet punktforflytting innenfor et forsøksvindu, kan senke innsatsen ved evaluering av BOS- teknikk. Dette er av mindre betydning, da denne teknikken viser svært små forskyvninger.

Punktmønsteret som var laget til dette forsøket besto av hvite ringer (sirkler) på ca. 0,1 mm i diameter og som var spredt utover en sort bakgrunn. Lyset kom fra en hvitt-lys blitzlampe, (Metz 40 MZ-2), som også kunne aktiveres av kontrollpanelet via en elektronisk bryter. Registrering av bakgrunns mønsteret ble gjort med et PCO kamera, (høyhastighetskamera for WindowsXP), i en enkel bildemodus, som var plassert 720 mm unna mønsteret og 460 mm unna laserens fokuseringspunkt.

Observasjonsområdet var på $69 \times 51,2 \text{ mm}^3$ og integreringstiden var stilt på $500 \mu\text{s}$ for å sikre at usikkerheten rundt flytting forårsaket av sjokkbølgen lå under den arealmessige oppløsningen til forsøksvinduet.

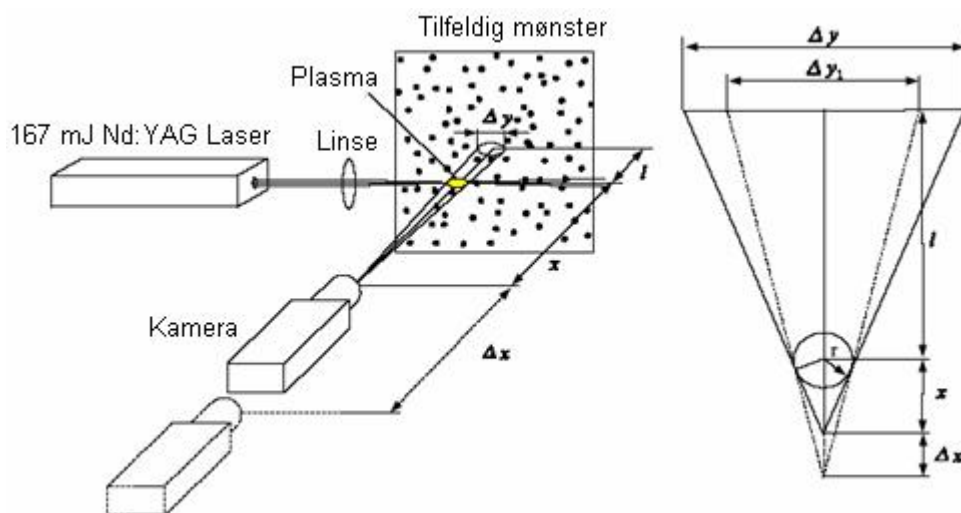
Analysen av de fremkalte bildene gjorde *Kähler et al. (2003)* med forsøksvinduer på 32×32 piksler og med 75 % overlapping. Oppløsningen til evalueringsmetoden ble målt til 0,0092 piksler og forholdet mellom den største forskyvningen og målingsfeilen var på rundt 100. Dette var ikke tilstrekkelig for å gjøre gode kvantitative tetthetsmålinger, (nøyaktige temperatur- og trykkmålinger kan eksempelvis fastsettes med 32 bits oppløsning), men det var nok til å gjøre kvalitative prøver.

Kähler et al. (2003) så at følgende bildesekvens viste utslag ved forflytting målt ved 15, 57.5 og 95 μs etter at overflaten ble forstyrret med en fokusert laserpuls (se figur 3-10). En kan tydelig se utbredelsen av en sfærisk bølge fra fokuseringspunktet inn i det åpne halvrommet, i tillegg til størrelsen og tapet til det oppvarmede området i fokuseringspunktet. Dessverre kan den høyeste toppen bare vises delvis fordi kameraet var mettet. Bølgefronten viser to maksimalpunkter med en fordypning i midten ved denne visualiseringen.



Figur 3-10: Ved forplantningen av en lydbølge på modellens overflate ble eksponeringstidene målt ved 15, 57,5 og 95 μs etter stimulering med en konsentrert laserimpuls.. Den stillestående spissen indikerer varmevirkningen forårsaket av en laserimpuls - Kähler (2003).

Kähler *et al.* (2003) så at når bildet eller objektplanet ble overført langs den optiske akse og det ble tatt en annen måling av samme prosess, så kunne teknikken kalibreres for kvantitative formål. Prinsippet for denne metoden kan betegnes som en enkeltaksens topografisk metode, og blir vist på venstre side i figur 3-11. På høyre side vises de geometriske egenskapene som gjør det mulig å lage en kalibreringslikning.



Figur 3-11: Prinsipielt BOS-oppsett og geometriske egenskaper for kalibrering av teknikken beregnet på kvantitativ undersøkelse - Kähler *et al.* (2003).

Kähler *et al.* (2003) konkluderer med at en turbulent, kunstig strømstruktur med bestemte egenskaper kan genereres uten forstyrrende ettervirkninger takket være fokuserte pulslaserstråler. Enten ved oppvarming av en fast overflate eller ved direkte disassosiering og ionisering av en gass.

Oppvarmingen er mulig ved enhver pulslengde og repetisjonshastighet, og formen kan være tilsvarende et punkt eller en linje. Det er også mulig med todimensjonale oppvarmingsområder bare laser er tilgjengelig.

Minimum energi som trengs for oppvarming av en turbulent strømstruktur i et laminært grenselag ble anslått til å ligge på $2,1 \text{ J/mm}^3$. Dette ligger under Re_{krit} , (Reynolds kritiske tall). De hevder også at ved å ta i bruk BOS- teknikken, ble det påvist at oppvarming henger sammen med generering av en akustisk, sfærisk bølge, som går ut ifra fokuseringspunktet. I tillegg vises det ved analyse at utbredeshastigheten til bølgen reduseres.

3.6 BOS-teknikk anvendt ved undersøkelse av transoniske turbinblad.

Loose et al. (2000) beskriver turbinbladmodeller som er utstyrt med film og kjølevæskefjerning, og som skal undersøkes i en vindtunnel som "Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt" (DLR) hadde anlagt i Göttingen i Tyskland. De umiddelbare hastighetsfeltene ble kvantitativt målt med PIV- teknik, mens tetthetsgradientfeltene ble kvantitativt målt med BOS- teknik.

Loose et al. (2000) hevder at de ved PIV- og BOS- målingene av tetthetsfeltene ble oppmerksom på hvilken effekt en endring av kompresjonssjokkstyrken hadde på resultatet, avhengig av kjølevæskens hastighet. De sammenlignet BOS med PIV, men mener BOS gir klare fordeler med hensyn på anvendelsesområdene.

De mener fremgangsmåten og resultatene vil bli presentert med tanke på de meteorologiske aspekter. En numerisk simulering av strømmens hastighetsfelt (figur 3-12) og en numerisk tetthetsgradientfordeling (figur 3-13) basert på beregnede lysdefleksjoner, vil utgjøre en kvalitativ sammenlikning med de allerede oppnådde testdata.

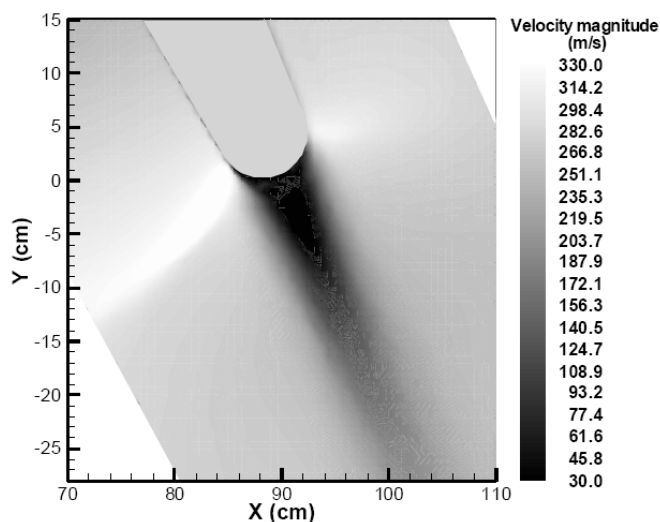
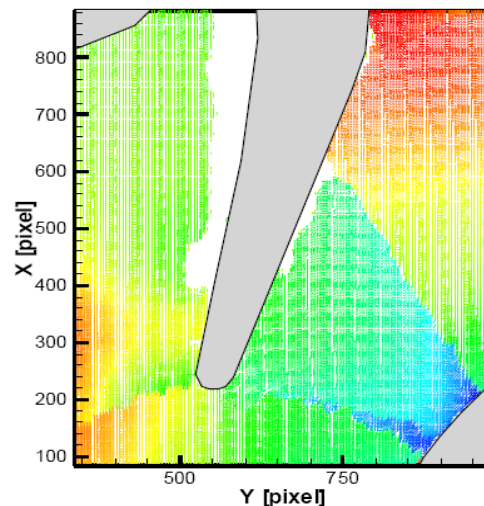


Fig. 3-12 Hastighetsfordeling i en transonisk strøm i en turbin (strømmen kommer ovenfra) -Loose et al. (2000).



Figur 3-13 Her måles tetthetsgradienter i en transsonisk strøm i en turbin med BOS teknikk. Gradientkomponentene dp/dx og dp/dy plottes som vektorer, og er fargekodet etter gradientens utslag. (Strømmen kommer ovenfra) - (Loose et al. (2000)).

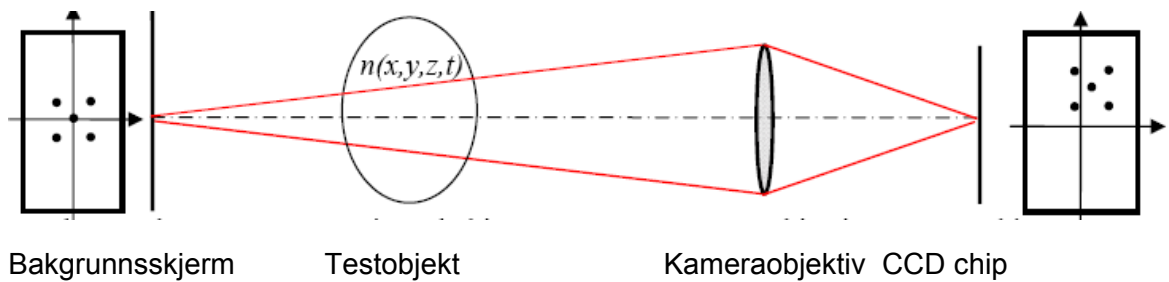
Loose et al. (2000) konkluderer med at de optiske testene med BOS- og PIV-teknikk ble utført over en kort periode for å demonstrere hvor viktige og sannsynlige disse instrumentene er. De hevder videre at beregning av lysbrytningen ble gjort på grunnlag av eksisterende og numerisk framskaffet data, for å få en kvalitativ sammenlikning. En kvantitativ sammenlikning kunne ikke vises, på grunn av at det ble brukt forskjellige parametere under de eksperimentelle og numeriske simuleringene. Til tross for vanskelige optaksforhold, var hastighets- og tetthetsgradientdata relativt enkle å få tak i, og passet bra til sammenlikningen av data gitt ved numeriske simuleringer.

3.7 BOS-visualisering av Marangoni effekten på mikrostrukturplater

Skornyakova et al. (2006) beskriver det optiske oppsettet til BOS- teknikken som sees i figur 3-14. Det består av en bakgrunnskjerm, strømmen som undersøkes, kameraobjektivet og CCD- matrisen. Skjermen består av et hvitt felt med svarte prikker (punkter).

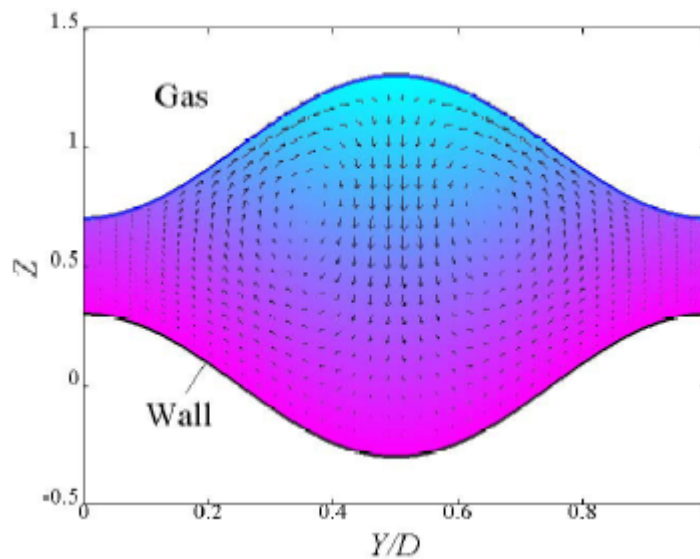
Hvis det ikke er noe strøm som passerer, vil kameraobjektivet vise et bilde på skjermen som ikke er vridd. Men når den optisk ikke-homogene strømmen blir plassert mellom skjermen og kameraet, vil skjermbildet fordreies. Som første tilnærming til klassifisering, eksisterer det to typer fordreining:

Type 1: Ekspansjon av prikkbildene Type 2: Forskyving av prikkene.



Figur 3-14 . Optisk oppsett for å motta BOS bilder av ikke-homogene strømninger - Skornyakova et al. (2006).

Skornyakova et al. (2006) beskriver at Marangoni- konveksjonen og deformer-ingen av grensesnittet i fordampingslaget i de strukturerte overflatene, har blitt visualisert ved bruk av BOS- teknik, og ved direkte visualisering av hastighetsfeltet. (Figur 3-15) Hastighetsfeltet innenfor en enkelt fuge i strukturen har form som en virvel. Hastigheten ved væske/gass grensesnittet rettes mot fugen i veggens topografi. Væskeshastigheten nær veggen styres i motsatt retning.



Figur 3-15 Visualisert med BOS: Typisk temperaturfordelingsområde, et hastighetsfelt og en formending i grensesnittet i en enkel platefuge som er oppvarmet - Skornyakova et al. (2006).

Skornyakova et al. (2006) konkluderer med at forskyvningsområdene i bakgrunnen, som fremstilles som et resultat av BOS- metoden, er i god overensstemmelse kvalitativt, sammenliknet med data samlet ved hjelp av andre metoder og ved teoretiske gjetninger.

I flere tilfeller er det mulig å bestemme om forskyvningene er forårsaket av uensartede temperaturforhold eller ved at det skjer en deformering ved grensesnittet. På den annen side burde metoden som beskrives her bli brukt i kombinasjon med andre eksperimentelle metoder som tillater uavhengige målinger av temperaturområdet eller målinger av fordeling av tettheten i laget.

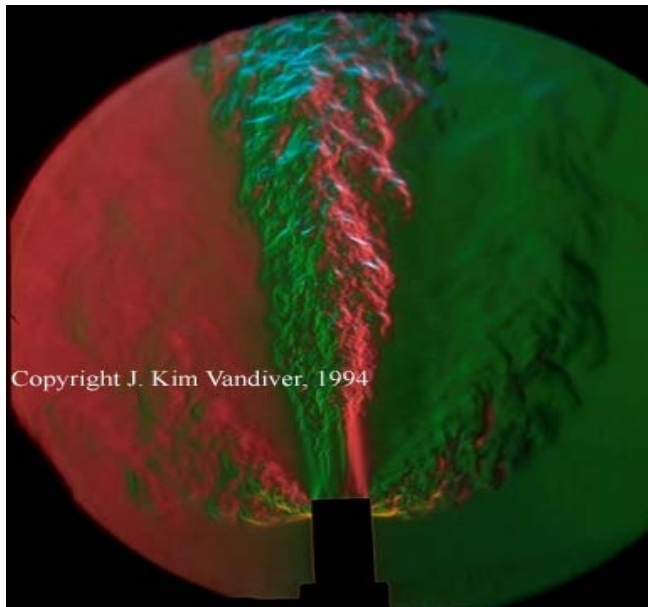
3.8 Visualisering med BOS- fotografering, tetthetsendringer oppstått ved lekkasje, forbrenning, varmeovergang og sjokkbølger.

3.8.1 Lekkasje/Utslipp

Ved lagring og transport av gasser og kjemikalier er det fare for at det kan oppstå en lekkasje til omgivelsene ved et uhell. Tusener har blitt rammet av slike ulykker, blant annet under et utslipp i Mexico City i 1984 og et annet i Flixborough, England i 1974.

Oppførselen til disse ”tykke” gassene er av stor betydning for de studier som gjøres omkring sikring og håndtering av industrigasser. Gasser kalles ”tunge” eller ”tykke” basert på deres relative tetthet til den omkringliggende luftens tetthet.

I figur 3-16 slippes hydrogengass ut av en multiport- dyse under kontrollerte former *Vandiver, (1994)*.



Figur 3-16 Et eksempel på gassutslipp visualisert vha BOS- teknikk – *Vandiver, (1994)*.

Tunge/tykke gasser plasseres hovedsakelig i fire kategorier, basert på hvordan de er blitt til:

- I første kategori finnes de gassene som har større molekylvekt enn vanlig luft ved romtemperatur. Under utslipp beholder de sin høyere tetthet inntil gassene fortynnes på grunn av innblanding med omkringliggende luft.
- Kategori to består av gasser som er kryogeniske, det vil si har svært lave temperaturer. Kryogeniske gasser må avkjøles til under -75°C for å kunne kondenseres. Disse har nødvendigvis ikke høyere tetthet enn luft ved romtemperatur, men på grunn av den kryogeniske prosessen har de svært lav temperatur og svært høy tetthet. Ved et utslipp vil tettheten minke på grunn av varmeoverføring fra omgivelsene og gradvis innblanding med omkringliggende luft *Jensen, (2003)*.
- Tredje kategori består av aerosole gasser og strømmer fylt med partikler. Aerosoler dannes ved at gasser satt under trykk og i væskeform slipper ut ved en lekkasje. Disse gassene blandes så sammen med luft og det dannes en sky, bestående av gass, luft og dråper av gass i væskeform. Tettheten øker når temperaturen minker som følge av gassens ekspansjon og blir større enn tettheten til ren luft. Partikkelfylte strømmer kalles også tunge gasser hvis den gjennomsnittlige tettheten til gassen og partiklene er større enn den i luft.
- Den siste kategorien består av gasser som er blitt til ved kjemiske reaksjoner mellom en gass med mindre tetthet enn luft og luften selv. Reaksjonene kan føre til hele skyer bestående av tunge gasser.

Oppførselen til de tunge/tykke gassene avhenger av deres tetthet kontra den rene luftens tetthet. Hvis forskjellen er liten, dvs. tettheten er tilnærmet den samme som luft, vil den tunge gassen være svært passiv og kun bevege seg som luftstrømmene rundt. Hvis forskjellen er stor og gassen har mye høyere tetthet, vil tyngdekraften påvirke gassens bevegelsesmønster og det kan oppstå situasjoner hvor gass under et utslipp, forøker seg selv i motvind.

3.8.1.1 Kryogeniske gasser

Kunsch et al. (2006) har studert kryogeniske gassers oppførsel ved utslipp under kontrollerte former. Ved å gjøre bruk av termoelementinstallasjoner, har det vært mulig å måle lokale temperaturer og ut fra disse, indirekte formulere seg fram til gassens gjennomsnittshastighet under ustabile utslipp. Dessverre fungerer ikke slike metoder når det skal måles hastigheter i større områder.

Kunsch et al. (2006) mener at nyere BOS- teknikk i to dimensjoner er å foretrekke som en mulig løsning, da tidligere Schlieren-metode krevde bruk av mange sensorer for å få en nøyaktig framstilling. Selv databehandlet tomografi, hvor tredimensjonalt bildedata kan behandles ut fra projeksjoner av gass-strømmen, krever flere kameraer for å få bedre oppløsning av bildene. Med bruken av bedre teknikker for digital bildetaking og prosessering, i samspill med sensitive korrelasjonsalgoritmer, kan forsøk foretas med kun ett kamera og med måling av kun todimensjonale temperaturfelter, noe som er både billigere og mindre tidkrevende.

Jensen, (2003) filmer en stillestående bakgrunn med et fast mønster som referansepunkt, dette filmer han med et kamera. Et faseobjekt befinner seg foran bakgrunnen, ved temperaturendring endrer det lufttettheten, og dermed forvrenges bildet som filmes. Når bildene sammenliknes, vil det dannes et felt med vektorer som viser forflyttingen til mønsteret i det målte arealet. Dette vektorfeltet representerer lysbrytningsindeksgradienten, og kan brukes til beregne lysbrytningsindeksen $n(x, y)$.

3.8.2 Forbrenning

En jetflamme blir til når en brannfarlig gass satt under trykk, slippes ut gjennom en åpning samtidig som den antennes. Utslipet kan skje gjennom et trykkavlastings-instrument eller et hull i en trykktank.

Hydrogenflammer skiller seg fra andre forbrenningsreaksjoner ved at de har mye mindre varmestråling enn for eksempel bensin. I praksis betyr det at brannfarlige materialer kan plasseres nærmere flammen uten at de tar fyr eller utgjør en risiko. Ved å studere hydrogen jetflammer ved hjelp av BOS- fotografering, kan man øke forståelsen for jetflammenes varmestråling og utforming og utvikle metoder for å forutsi hvordan varmestrålingen fra en flamme vil variere i både tid og rom.

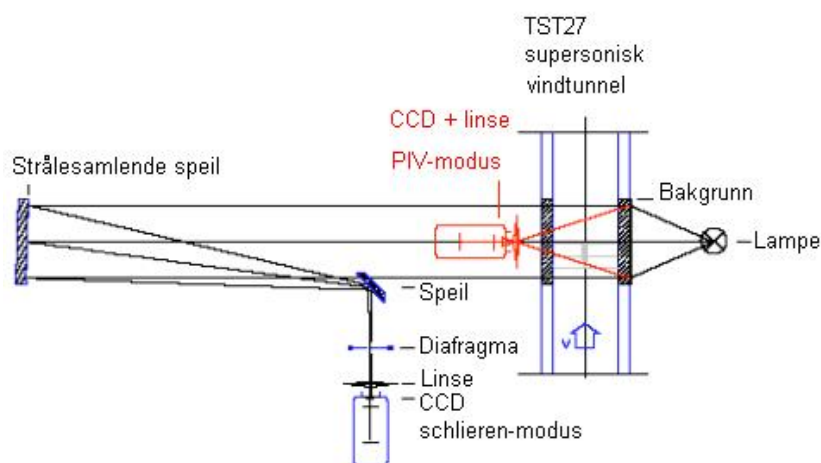
Forståelsen for de karakteristiske trekkene for hydrogenflammer under ulike forhold, kan bedre oppbevaringsmulighetene for hydrogen og bedre avstandsberegningene som kreves til det offentlige rom og til andre brennbare materialer i tilfelle antennelse/brann.

I forbindelse med antennelse/brann viste en artikkel i *Kraftjournal nr. 6/2004* hvordan blandingsforholdet mellom gasser og luft må være. Den laveste volumprosent av gasser som kan antennes er Lower Explosive Limit (LEL). Den høyeste volumprosent av gasser som kan antennes er Upper Explosive Limit (UEL). I området mellom LEL og UEL er blandingen antennbar og eksplosiv. Jo større avstand det er mellom LEL og UEL, jo større er muligheten for at det kan oppstå en eksplosiv gassblanding ved for eksempel lekkasje.

3.8.3 Varmeovergang

Elsinga et al. (2004) mener at hittil har visualisering av tetthetsendringer ved varmeovergang bare vært nyttiggjort i aerodynamiske undersøkelser av supersoniske strømmer i vindtunneler. Endringer i termofysiske væskeprosesser har ofte vært for små til å kunne dokumenteres med slike instrumenter, og dermed har de vært lite brukt.

I nyere tider har strømbevegelser basert på målinger gjort med lysrefraksjon fått et oppsving, i stor grad takket være nye digitale videokameraer med større oppløsning enn tidligere (antall piksler mer enn 10^6), og en ny generasjon datamaskiner med en frekvens på mer enn 2 GigaHertz og med et dataminne på mer enn 20 Gigabytes. Disse nyvinningene, kombinert med BOS fotografering, gjør det mulig å gjøre forsøk på mindre synlige endringer i en strøm, som for eksempel i væskekonveksjon nær oppvarmede objekter. Figur 3-17



Figur 3-17 Skjematisk tegning av BOS-oppsett (blått) og PIV-metode (rødt) - *Elsinga et al. (2004.)*

3.8.4 Varmeovergang i organisk glass.

Skornyakova et al. (2003) sier at eksperimenter med organisk glass er nyttige for å få visualisert endringer grunnet varmebølger og dermed få vist hvordan varmen spres gjennom materialet. Det er fordi organisk glass har høy varmeledningskoeffisient og tilsvarende høyere oppvarmingshastighet og et større lag av oppvarmet materiale enn andre eksperimentelle objekter.

Et annet argument er at kanteffekter har mindre betydning for disse forsøkene enn ved forsøk med naturlig konveksjon nær varmeobjektet.

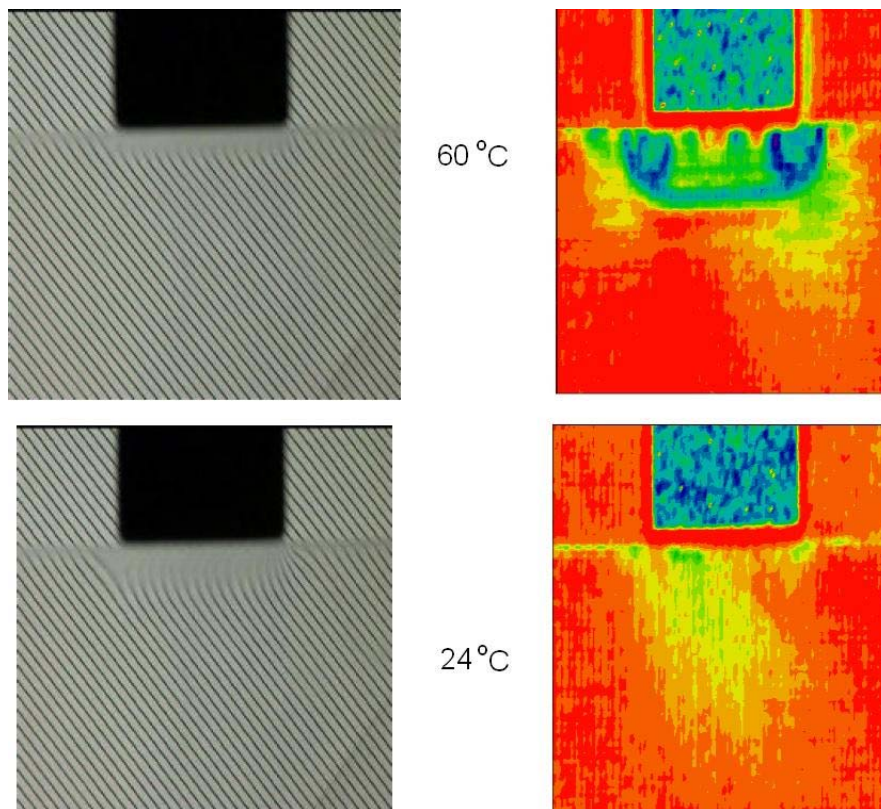
Under et slik eksperiment plasserte *Skornyakova et al. (2003)* en metallbeholder fylt med varmt vann oppå den øverste kanten til et pleksiglass. Vannets temperatur ble målt med et termometer og vinkelen til det optiske avviket gjennom avgrensingsmediet (glasset) ble definert ut fra følgende likning:

$$\alpha(y_0, l) = n \int_0^l (dn/dT) [dT(y, z)/dy] dz$$

Her symboliserer y_0 - koordinaten der hvor lysstrålen entrer avgrensingsmediet, l er lengden på grensemediet strålen passerer gjennom, n er mediets lysbrytningsindeks, dn/dT er koeffisienten som viser indeksens avhengighet av temperaturen, mens $dT(y, z)/dy$ er temperaturgradienten i avgrensingsmediet. Hvis temperaturgradienten ikke er like avhengig av z -koordinaten, fører det til en forenkling av likningen:

$$\alpha(y_0, l) = n * (dn/dT) [dT(y_0)/dy] * l$$

I figur 3-18 ser man varmeoverføring gjennom glass. Til venstre ser man visualisering og til høyre ser man korrelasjonsprosessering. Varmekildens temperatur er markert for hvert forsøk *Skornyakova et al. (2003)*.



Figur 3-18 Varmeoverføring gjennom glass - Skornyakova et al. (2003).

3.8.5 Sjøkkbølger

Background Oriented Schlieren- fotografiering er en fototeknikk som kan avsløre sjokkbølger og blir aktivt benyttet i sikkerhetsopplegg i flyindustrien for å se hvordan luftstrømmer/ turbulens oppstår, noe som kan ha store konsekvenser for flysikkerheten. Rolig luft gir rolige bilder, mens turbulens gir flimrende bilder. Her kreves det et kamera med en superrask eksponering.

I en rapport av *Settles (2006)* har man studert sjokkbølger ved skyting med rifle. Bilde (figur 3-19) er fryst akkurat i det øyeblikket kula forlater rifla. Hastigheten til kula er på omkring Mach 2,5. De sfæriske sjokkbølgene fra munnings-smellet og de "pilformede" sjokkbølgene bak kula er vanligvis usynlige.



Figur 3-19 Høyhastighetsfotografering av rifleskudd av kaliber 30-06 - Settles, (2006).

Mens figur 3-19 ble fanget inn på vanlig film, fins det nå en ny digital videoteknologi som kan fange inn sjokkbølgenes fordreining av bakgrunsmønsteret, og som gjør at man blir i stand til å få den klassisk optiske teknikken over i moderne tid, hvor en kan fotografere høyoppløselige detaljer av ballistiske hendelser over store synsfelt og under realistiske vilkår Settles, (2006).

3.8.5.1 Bildebehandling av sjokkbølger med BOS

I en rapport av *Sommersel et al. (2007)* blir BOS- metoden anvendt for å visualisere tetthetsgradientene i flere forsøk utført på Raufoss i 2005. Metoden var avhengig av variasjonene til brytningsindeksen i det gjennomsiktige mediumet, eksempelvis luft, beroende på tetthetsgradientene. Metodens prinsipp er en numerisk sammenlikning av et forskjøvet og et ikke-forskjøvet bilde av bakgrunnen. I dette tilfelle var bakgrunnen en skog.

Slik *Sommersel et al. (2007)* fremstiller det i figur 3-20, består prinsippet til denne bildebehandlingsteknikken som følger: Ved å trekke et ikke forskjøvet bilde fra et som var forskjøvet, kan sluttbildet bli behandlet med en logaritmisk intensitetsprosess.

Posisjonene til sjokkbølgefronten leses av manuelt for sluttbilde. Ved å ta gjennomsnitt av sjokkbølgeposisjonene kontra tid, ble Mach- nummeret til sjokkbølgen estimert og sjokkbølgens trykk ble beregnet med

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} * (M^2 - 1)$$

Sommersel et al. (2007) utviklet også numeriske algoritmer i MATLAB for bildebehandling og trykkberegninger.



Figur 3-20 Prinsippet på bildebehandling *Sommersel et al. (2007)*.

Sommersel et al. (2007) konkluderer med at BOS- teknikken kan brukes til å estimere overtrykket til en eksplosjon som oppstår fra høyeksplosiver i tillegg til gasseksplosjonen.

For høyeksplosiver er metoden ganske samsvarende med en standardkurve for sjokktrykket. For gasseksplosjonene fant man at sjokkbølgene spredde seg raskere i horisontal retning enn i vertikal retning. Det ble også observert at den første sjokkbølgen etterfølges av flere sjokkbølger. Ut fra dette, vil det være mulig å bruke denne teknikken til å undersøke eksterne trykkbølger og eksterne eksplosjoner fra utløste gasseksplosjoner.

4 FORSØK MED HØYHASTIGHETSKAMERA

I maskinhallen på Høgskolen i Telemark ble de fleste fysiske eksperimentene foretatt. Det ble klistret opp bakgrunner med valgte mønstre opp på en vegg som dekket det meste av kameraets synsvinkel.

Av utstyr ble det benyttet et X-Stream X5-3 høyhastighetskamera og en Dedacool lyskaster som lyskilde. Det fins høyhastighetskamera som kan filme opptil 30 000 bilder i sekundet og med et slik kamera kan man se ting som skjer fortere enn øyet vårt klarer å oppfatte. Vårt kamera var ikke av slik karakter. Som eneste kilde til varmebølge ble det brukt et vanlig stearinlys som var plassert oppå et bord.

Det ble for det meste tatt enkeltbilder, da forskjellen fra bilde til bilde dannet selve basisen bak hver visualiseringsprosess og lange filmer var ikke nødvendige.

4.1 Vår intensjon med forsøkene.

Hensikten med den eksperimentelle delen av prosjektet var å finne ut av hvilke forhold som ga gode resultater, i denne sammenheng, best mulig observasjon av hendelsesforløpet ved utslipp av hydrogen.

Ved å undersøke filmer tatt ved forskjellige forhold og beregne ulike parametere, ville det være mulig å finne fram til de mest optimale, for så å bruke disse videre til å utvikle måledata for praktisk bruk. Av relevante faktorer kan nevnes avstand fra bakgrunn til kamera, eller fra bakgrunn til varmekilden, størrelse og form på mønsteret brukt som bakgrunn, hvor mye lys som slipper igjennom fotolinsen og hvor lang tid som brukes på å ta hvert enkelt bilde.

Etter at disse forsøkene var gjort og optimale parametere, som optimal avstand mellom bakgrunn og varmekilde (z_{opt}) og optimal oppløsning (A_{opt}), var blitt beregnet, gjensto det å teste ut tilnærmede forhold for ulykker med hydrogen.

Det ble tatt filmer hvor hydrogenstrømmene var antent, hvor de ikke var antent og hvor mengde gass per tid varierte. Alt for å se hvordan gasstrømmene oppførte seg under ulike forhold, og for å se om beregningene gjort i forkant hadde sammenheng med den faktiske oppførselen til hydrogen. Resultatene ville være med på å hjelpe videre utvikling av sikkerhetstiltak.

4.2 Bilde og beskrivelse av forsøksoppsettet

I figur 4-1 vises det enkle forsøksoppsettet vi hadde ved forsøkene som ble gjort høsten 2006 og i januar 2007.



Figur 4-1 Forsøksoppsettet i maskinhall ved Høgskolen i Telemark

1) Dedacool lyskaster

Økte lysmengden inn mot bakgrunnsmønsteret for å få klarere bilder av forskyvning grunnet tetthetsgradienter.

2) X-Stream XS-3 High Speed kamera

Høyhastighetskamera filmet eksperimentene og fanget opp forskyvning når lyset ble bøyd av.

3) Stearinlys

Brukt som provisorisk varmekilde for å finne optimale forhold å filme under.

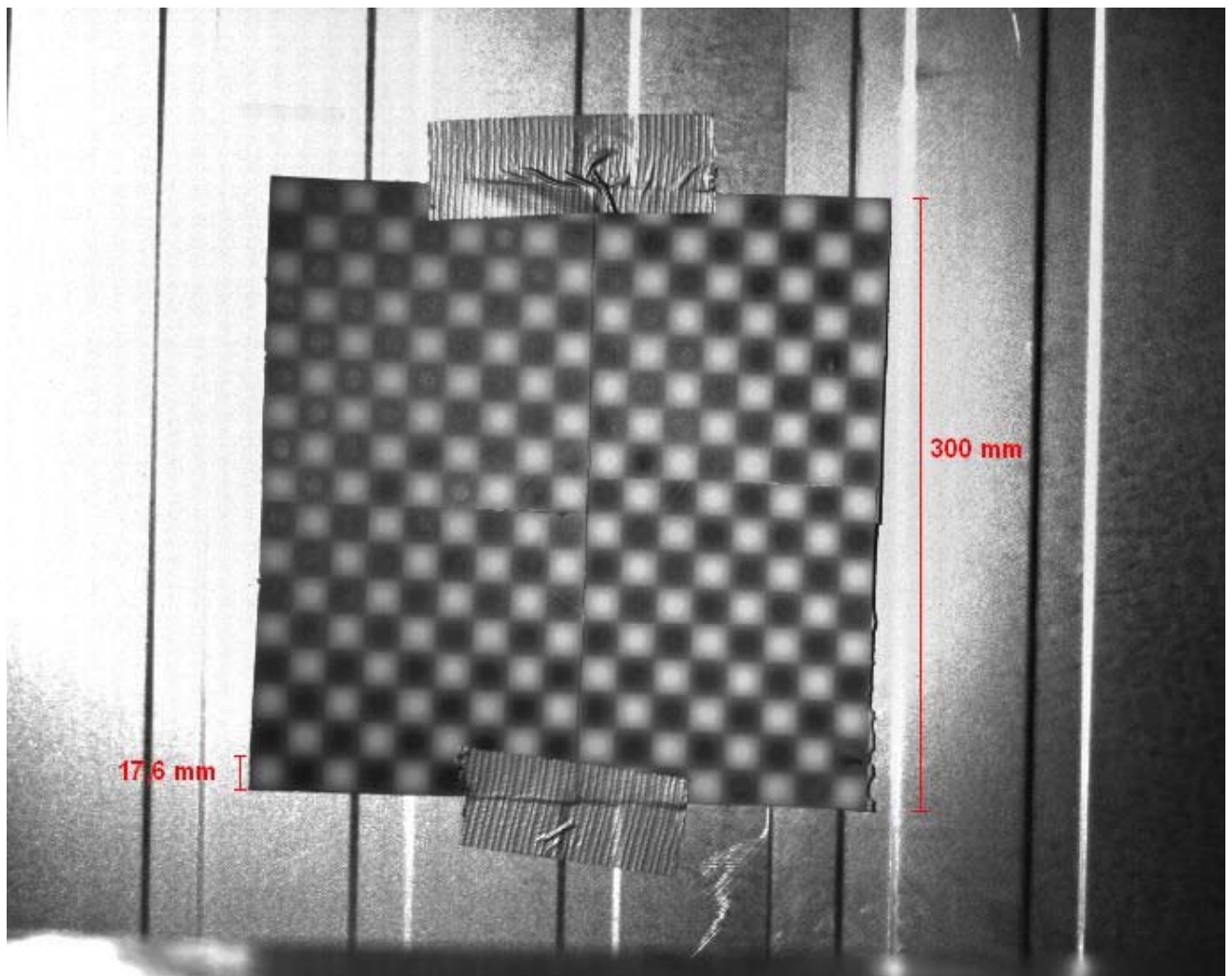
4) Bakgrunnsmønster på vegg

Prikkmønstre brukt som bakgrunn for å få bildeforskyvning tydeligere fram på hvert bilde.

5) MotionPro X Studio

Dette dataprogrammet ble brukt til å styre kameraet og lagre filmene via en bærbar pc.

I figur 4-2 er det tatt nærbilde av bakgrunnsmønsteret. Den totale bakgrunnen var 300 mm, og det var ~ 17,6 mm fra prikk til prikk på denne bakgrunnen med det største mønsteret.



Figur 4-2 Viser nærbilde av bakgrunnen i oppsettet.

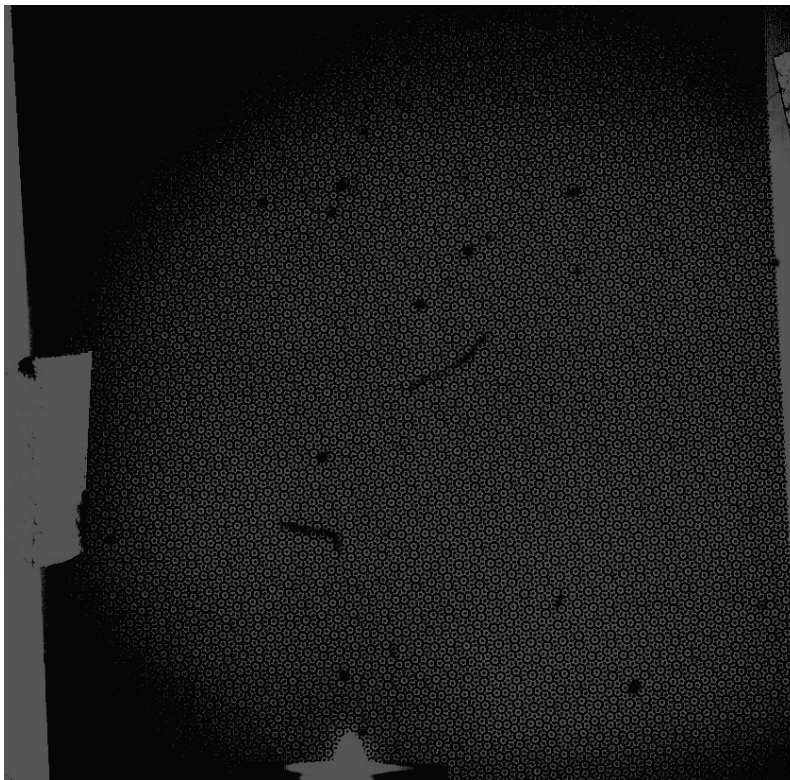
4.3 Forsøkene fra 26.09.06, 10.10.06, 20.11.06 og 22.01.07

4.3.1 Forsøk fra 26.09.06 med stillbilder og film.

Under dette forsøket ble det tatt både stillbilder og et par filmer. Det ble gjort test på forholdet mellom avstanden fra kamera til stearinlyset og fra stearinlyset til bakgrunnen.

4.3.1.1 Test 1 – kun et stillbilde.

Test 1 var kun et stillbilde med bakgrunnen og stearinlyset var ikke tent. Denne testen ble gjort for å undersøke at bakgrunnsmønsteret kom tydelig fram på hvert bilde ved denne avstanden. Se figur 4-3.



Figur 4-3 Test 1 fra 26.09.06. Stillbilde m/bakgrunn

4.3.1.2 Test 2 – flammen tent, kun stillbilder.

Under test 2 var flammen på stearinlyset tent og det ble kun tatt stillbilder. Dette var for å sjekke hvordan varmekilden, i disse første testene var det et stearinlys, kom fram på bildene.

4.3.1.3 Test 3 – fortsatt bare stillbilder.

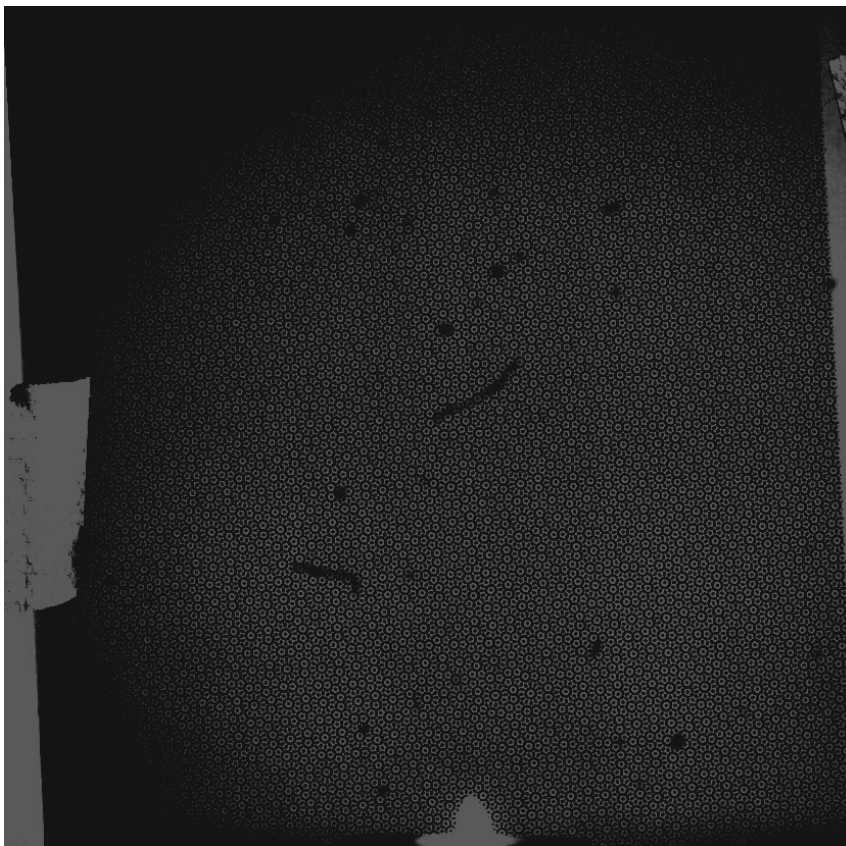
I test 3 ble det fortsatt bare tatt stillbilder og stearinlyset plassert halvveis mellom veggen og kamera.

4.3.1.4 Test 4 – stearinlyset satt nær bakgrunn, kamera i samme posisjon.

Under test 4 ble stearinlyset plassert helt opptil bakgrunnen, mens kameraet beholdt sin posisjon. Dette var for å teste hvordan forskjellige plasseringer av varmekilden, i forhold til kameraet, ville påvirke forskyvningen i bakgrunns mønsteret.

4.3.1.5 Test 5 – kamera og stearinlys i samme posisjon - 10 stillbilder tatt.

Med test 5 hadde kameraet og stearinlyset de samme posisjonene, og det ble tatt en rekke på 10 stillbilder for å se endringene i bakgrunns mønsteret over en viss tid. Flammen var på. Se figur 4-4.



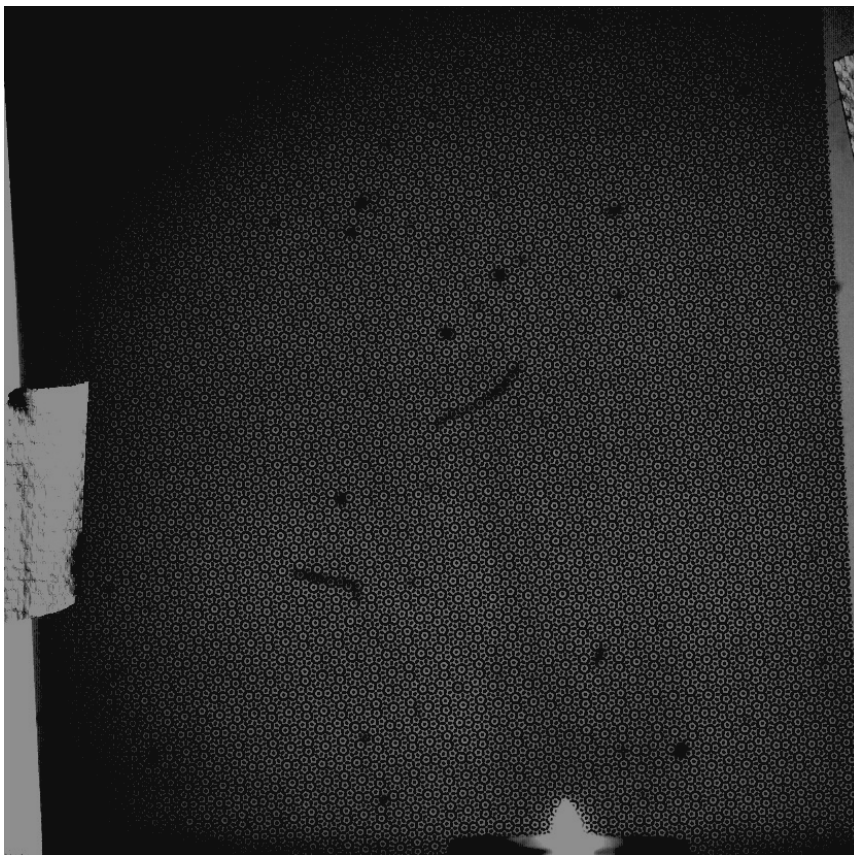
Figur 4-4 Test 5 fra 26.09.06. Flammen var på

4.3.1.6 Test 6 – se bakgrunnsendring med bilde uten flamme.

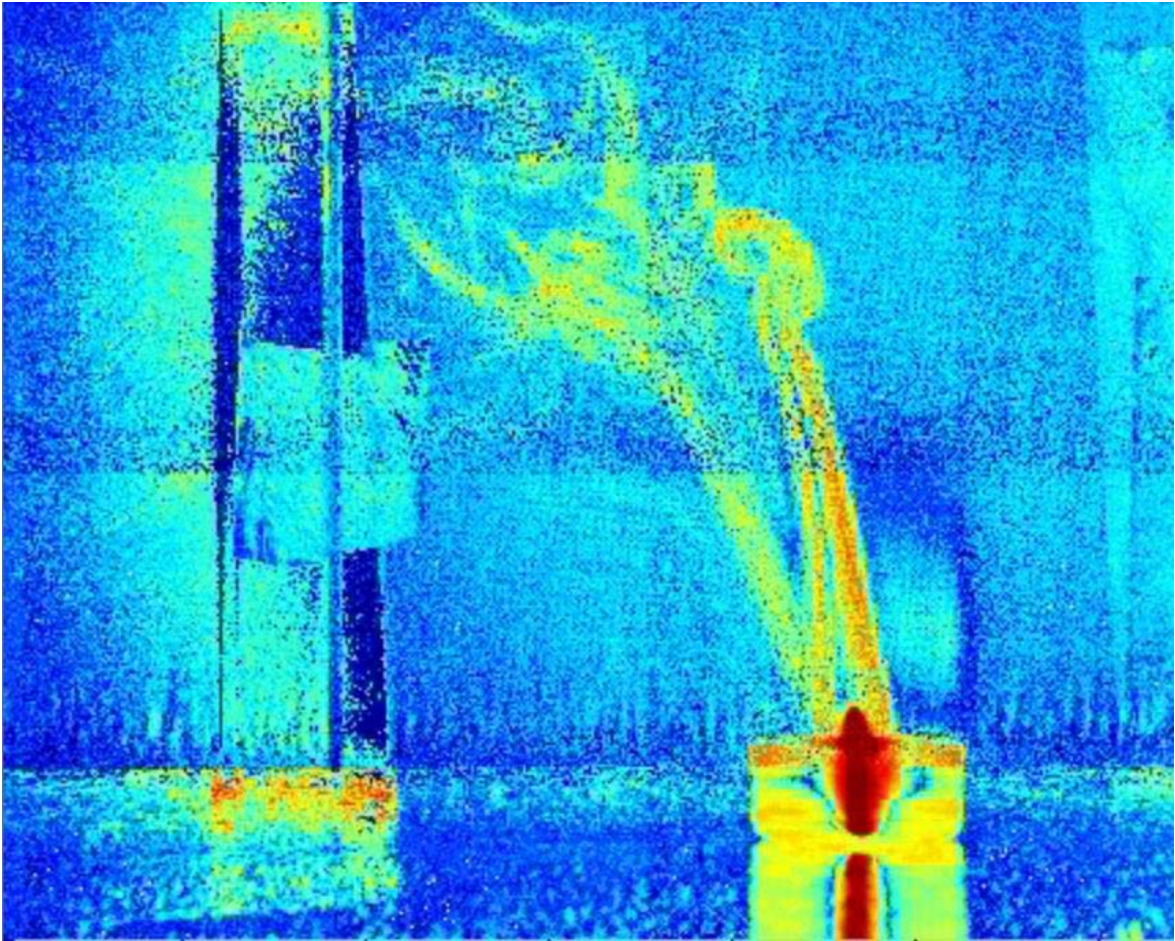
I test 6 ble det tatt et stillbilde, men uten at flammen var på. Dette var for å kunne se forskjell på bildene fra samme oppsett, og hvordan bakgrunnen så ut fra et bilde uten flamme til et bilde med flamme.

4.3.1.7 Test 7 – tatt AVI-film, med flamme på, test også visualisert vha Matlab.

Under test 7 ble det tatt en AVI film med flammen på og med ti bilder (frames) totalt. Se figur 4-5 og figur 4-6 (visualisert ved hjelp av Matlab). Det ble nå brukt AVI - filformat fordi dette bevarte mest mulig av de visuelle dataene.



Figur 4-5 Test 7 fra 26.09.06 Flammen på.



Figur 4-6 Test 7 – visualisert vha Matlab 26.09.06

4.3.1.8 Test 8 – tatt ny AVI - film, men uten flamme.

Med test 8 ble det også tatt en AVI film med ti bilder, men da uten flamme. I etterkant ville det vært mer logisk med kun ett bilde for oppsett uten flamme, da bare ett bilde er nødvendig for referanseformål.

I tabell 4-1 er informasjonen fra testene samlet.

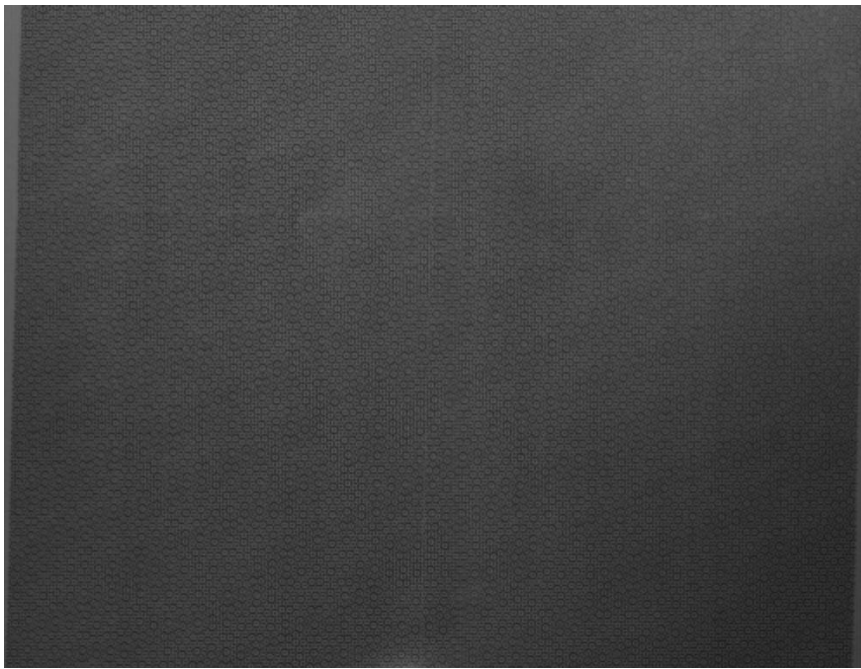
Tabell 4-1 Forsøk fra 26.09.06 med stillbilder og film

	Flamme på	Stillbilde/Film	Kommentar
Test nr. 1	Nei	Stillbilde	Mønster kom fram
Test nr. 2	Ja	Stillbilde	Sjekket stearinlys
Test nr. 3	Ja	Stillbilde	
Test nr. 4	Ja	Stillbilde	Påvirkning på mønsteret pga varmekilden
Test nr. 5	Ja	10 Stillbilder	Endring i mønster over tid
Test nr. 6	Nei	Stillbilde	Sjekket u/flamme i forhold til m/flamme
Test nr. 7	Ja	AVI-film	
Test nr. 8	Nei	AVI-film	Hadde holdt med bilde som referanseformål

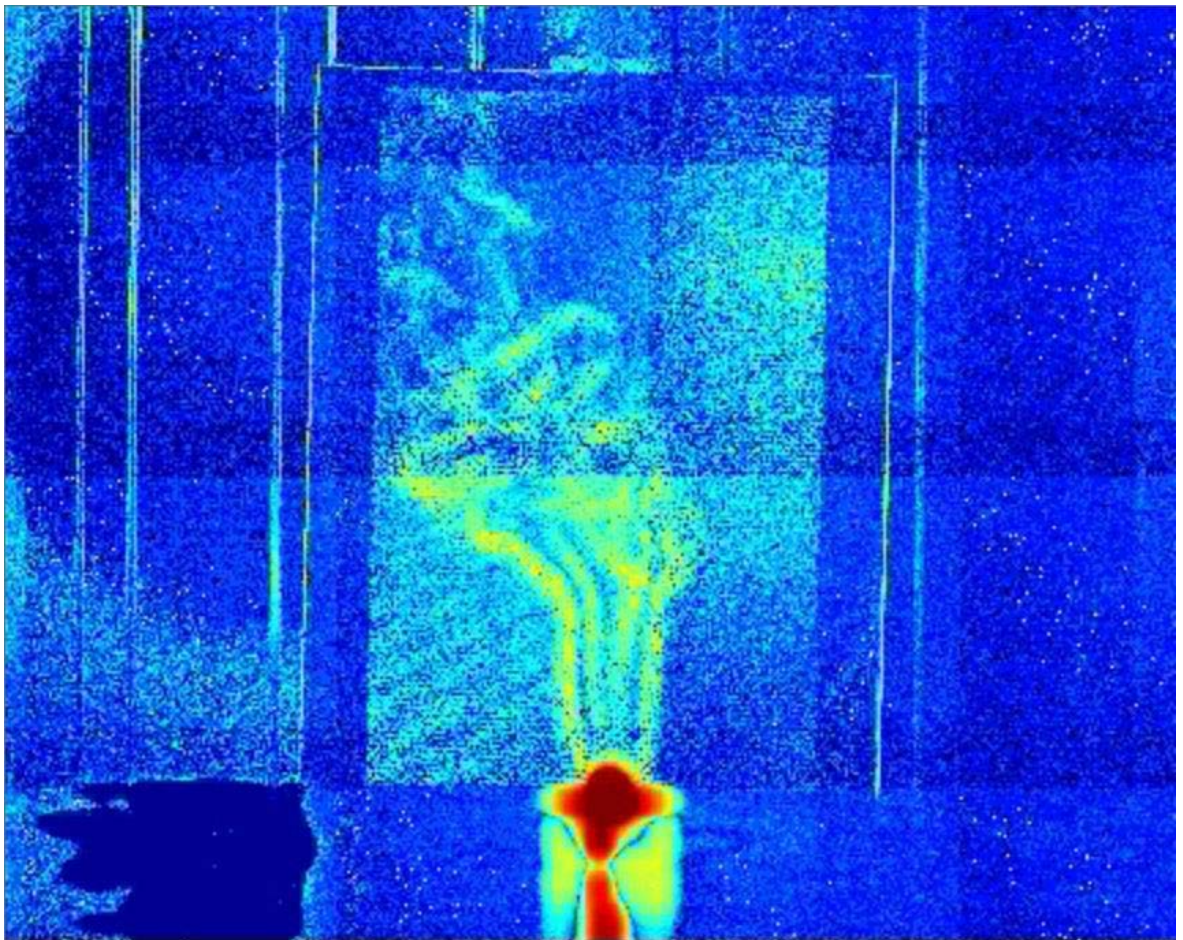
4.3.2 Forsøk fra 10.10.06 – m/optimalisering

4.3.2.1 Test 1 – linsen kalibrert med fokus på vegg ca. 3 meter unna.

Kameralinsen ble kalibrert med fokus på veggen litt under 3 meter unna. Bildefrekvensen var innstilt på 500 Hz, mens eksponeringstiden var innstilt på 1899 μ s. Lysstyrken viste seg å være optimal med en åpning på 2.8. Denne optimale innstillingen ga allikevel utydelig mønster i bakgrunnen. Se figur 4-7 og figur 4-8 (visualisert ved hjelp av Matlab).



Figur 4-7 Test 1 fra 10.10.06 Vegg 3 meter unna.



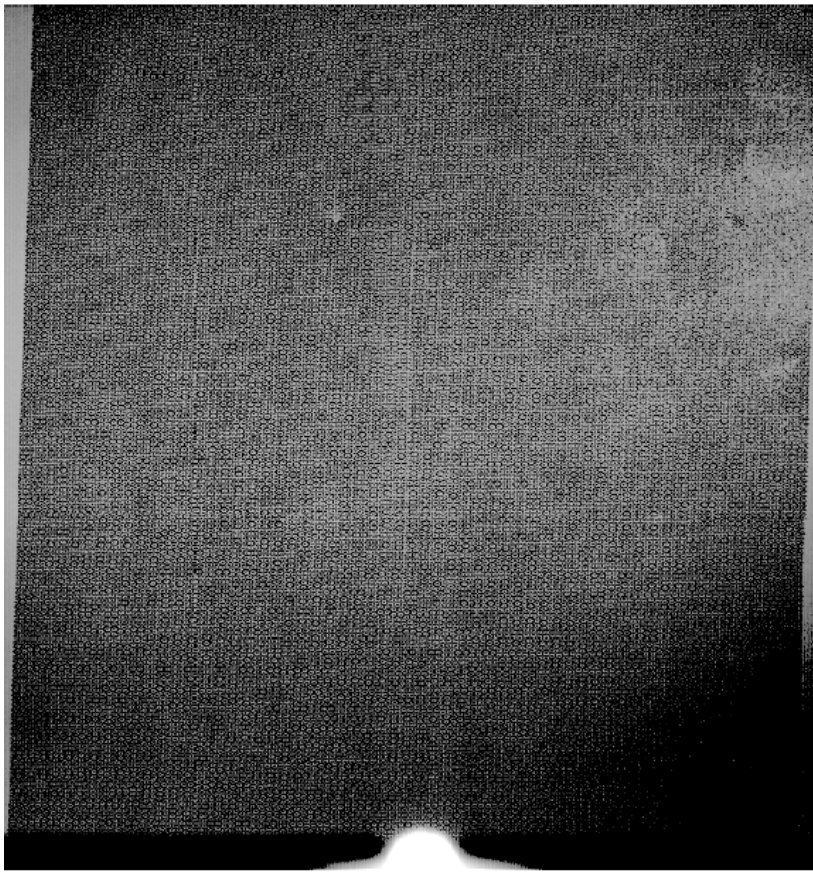
Figur 4-8 Test 1 fra 10.10.06 visualisert vha Matlab – Vegg 3 meter unna

4.3.2.2 Test 2 – samme fokus, bildefrekvens ble endret.

Kameraet ble ikke flyttet, så fokuset var det samme. Bildefrekvensen ble nå endret til 250 Hz, mens eksponeringstiden var fortsatt på 1899 μ s. Lysstyrken viste seg nå å være optimal på et sted midt mellom 1.8 og 2.8. Denne optimale innstillingen ga også utydelig mønster i bakgrunnen.

4.3.2.3 Test 3 – samme opplegg, men eksponeringstid endret.

Kameraet stod på samme sted, og bildefrekvensen var fortsatt på 250 Hz. Eksponeringstiden ble derimot endret til 2685 μ s. Lysstyrken viste seg å være optimal på 2.8 igjen. Denne innstillingen ga nok en gang et utydelig mønster i bakgrunnen. Se figur 4-9.

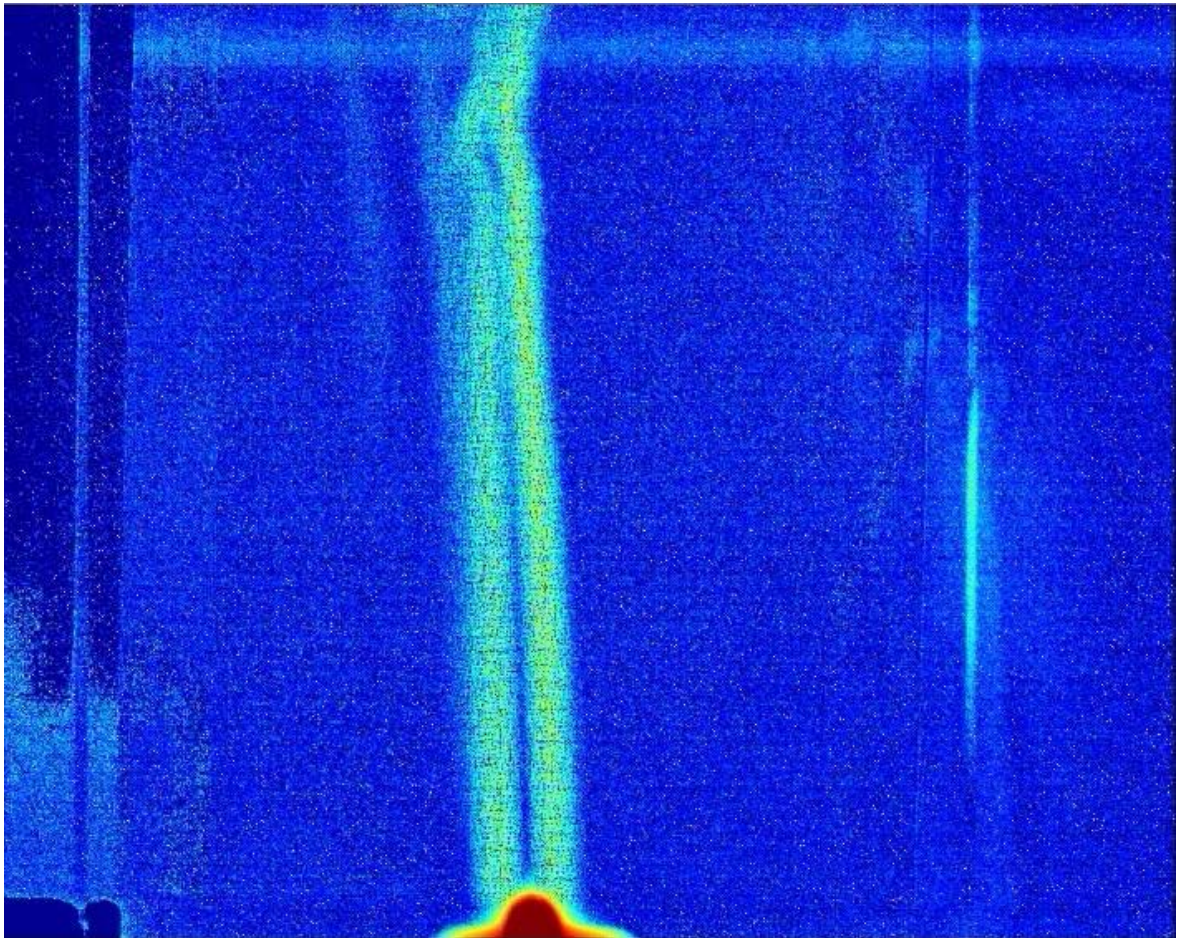


Figur 4-9 Test 3 fra 10.10.06 Endret eksponeringstid

4.3.2.4 Test 4 – Matlab-visualisert – fokus justert til mellom 3 og 1,5 meters avstand.

Kameraet ble plassert nærmere vegg, og fokus ble justert til midt mellom 3 og 1.5 meters avstand for å være mest mulig tydelig. Bildefrekvensen var fortsatt på 250 Hz og eksponeringstiden var fortsatt på 2685 μ s. Lysstyrken viste seg å være optimal på 2.8 igjen. Denne innstillingen ga et tydeligere mønster i bakgrunnen og varmebølgene fra stearinlyset kom klarere til syne.

Forsøket ble så ved hjelp av Matlab visualisert, se resultatet i figur 4-10. Denne visualiseringen ble dessverre ikke god, da flammen fra stearinlyset var relativt liten og varmebølgene steg opp i en svært laminær strøm.



Figur 4-10 Test 4 fra 10.10.06 visualisering vha Matlab – Fokus mellom 3 meter og 1,5 meter

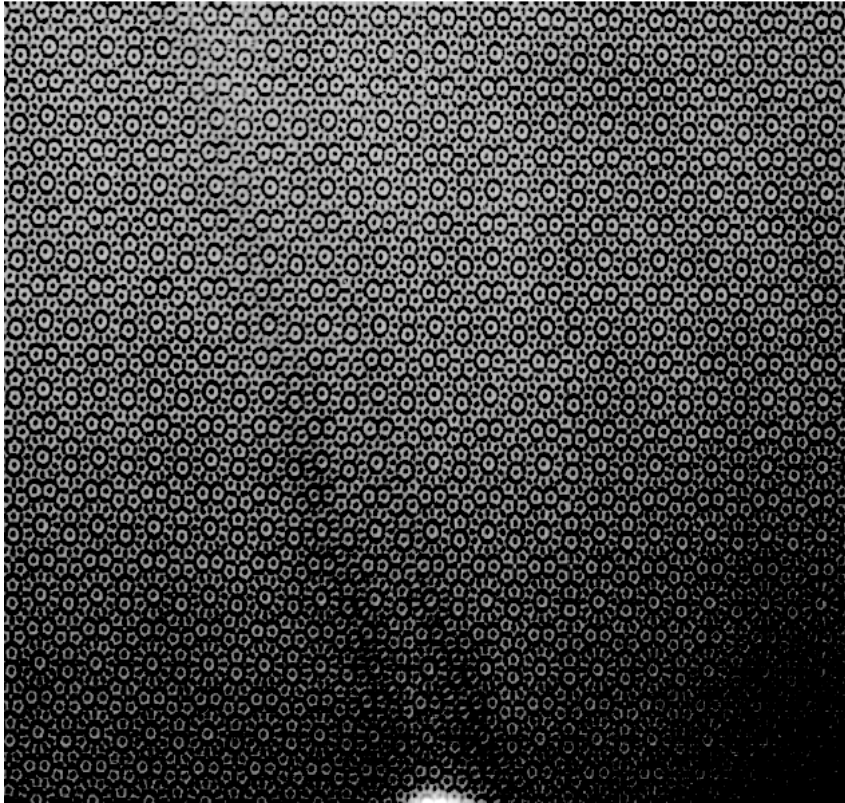
4.3.2.5 Test 5 – bildefrekvens og eksponeringstid endret.

Kameraet stod på samme sted, mens bildefrekvensen ble endret til 500 Hz og eksponeringstiden til 1897 μ s. Lysstyrken var den samme som før. Denne innstillingen ga et enda klarere mønster enn forrige.

4.3.2.6 Test 6 – kamera nær bordet m/lyset, fokus 1,4-1,3 meters avstand til bakgrunn.

Kameraet ble plassert nesten inntil bordet med stearinlyset, med linsefokus justert til mellom 1.4 og 1.3 meters avstand til bakgrunnen. Bildefrekvensen var den samme som før, mens eksponeringstiden lå på 1996 μ s.

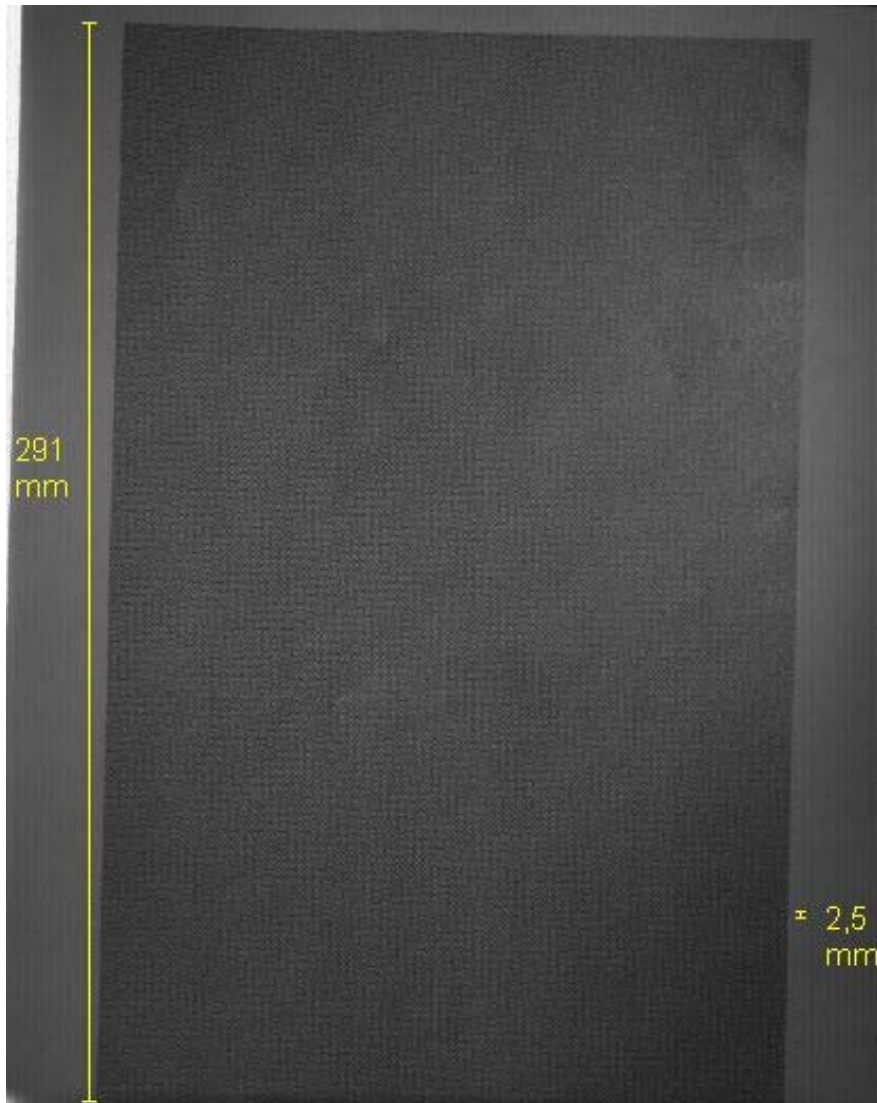
Lysstyrken viste seg nå å være optimal mellom 2.8 og 1.8, tett opp under 2.8. Denne innstillingen ga det klareste bildet hittil. Se figur 4-11



Figur 4-11 Test 6 fra 10.10.06 1,4 – 1,3 meter til bakgrunn

4.3.2.6.1 Beregninger av optimale verdier ved forsøket fra 10.10.06

Dimensjonen for bakgrunns mønsteret som ble brukt ved dette forsøket var det nest største. (Figur 4-12)



Figur 4-12 Viser det nest største dimensjon av bakgrunnen i forsøket fra 10.10.06

Hele bakgrunn var 29,1 cm – 291 mm lang. Det var ~ 0,25 cm – 2,5 mm fra prikk til prikk på bakgrunnen. Linsens brennvidde var på 50 mm.

Brukte så disse opplysningene til å regne ut optimale verdier for forsøket fra 10.10.06.

FAH er avstand mellom to punkter i det fokuserte feltet i bakgrunn. f er brennvidde, $f\#$ er blenderåpning.

$$e_{optimal} = \frac{FAH}{\frac{f}{f\#} + FAH}$$

$$e_{optimal} = \frac{0,9mm}{2,8 + 0,9mm}$$

$$e_{opt} \approx \underline{0,243}$$

Optimal oppløsning A blir:

$$A = e_{optimal} * \frac{f}{f\#}$$

$$A = 0,243 * 2,8$$

$$A = A_{opt} \approx \underline{0,68}$$

Optimal avstand fra bakgrunn til varmekilde i testene 1 til 3 var:

$$e = \frac{z}{P}$$

$$\rightarrow z = P * e$$

$$z = 3000 \text{ mm} * 0,243$$

$$z = z_{opt} = 729 \text{ mm} = \underline{0,729 \text{ m}}$$

Optimal avstand fra bakgrunn til varmekilde i testene 4 og 5 var:

$$e = \frac{z}{P}$$

$$\rightarrow z = P * e$$

$$z = 2250 \text{ mm} * 0,243$$

$$z = z_{opt} \approx 546,8 \text{ mm} = \underline{0,5468 \text{ m}}$$

Optimal avstand fra bakgrunn til varmekilde i test 6 var:

$$e = \frac{z}{P}$$

$$\rightarrow z = P * e$$

$$z = 1350 \text{ mm} * 0,243$$

$$z = z_{\text{opt}} \approx 328,1 \text{ mm} = \underline{0,3281 \text{ m}}$$

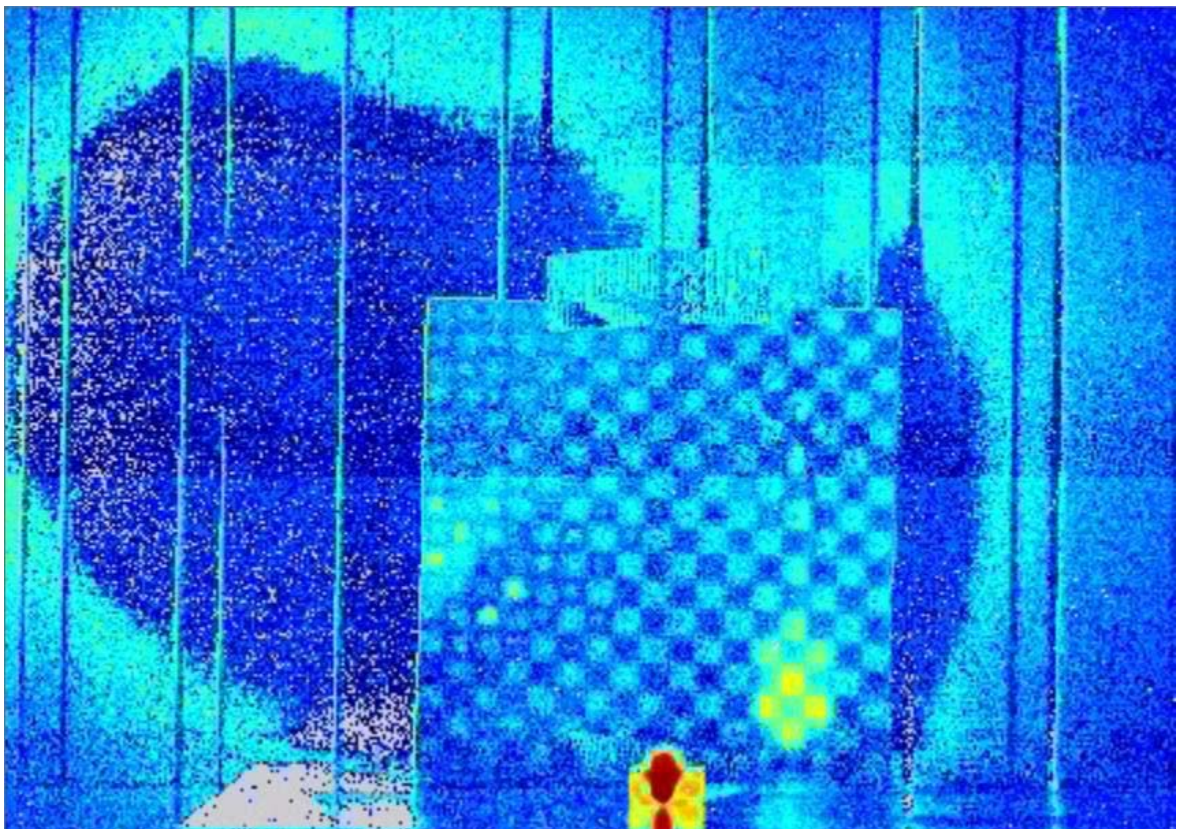
Tabell 4-2 Forsøk fra 10.10.06 m/optimalisering

	Bilde- frekvens	Eksp,tid	e _{opt}	z _{opt}	Avstand P	Kommentar
Test nr. 1	500 Hz	1899 μs	0,243	0,729 m	3,000 m	Utydelig mønster
Test nr. 2	250 Hz	1899 μs	0,243	0,729 m	3,000 m	Utydelig mønster
Test nr. 3	250 Hz	2685 μs	0,243	0,729 m	3,000 m	Utydelig mønster
Test nr. 4	250 Hz	2685 μs	0,243	0,5468 m	2,250 m	Klarere enn test 3
Test nr. 5	500 Hz	1897 μs	0,243	0,5468 m	2,250 m	Klarere enn test 4
Test nr. 6	250 Hz	1996 μs	0,243	0,3281 m	1,350 m	Klareste mønster

4.3.3 Nye forsøk med stearinlys fra 20.11.06

4.3.3.1 Test 1 – Visualisert vha Matlab.

I test 1 var avstand til bakgrunn, litt over 3 meter. Avstand til lyskilde var også 3 meter, og det var med flamme. Se figur 4-13, visualisert ved hjelp av Matlab. Den Matlab- behandlede filmen viser ikke varmestrømningene klart på denne avstanden, og det ser i tillegg ut til å være en sekundær lyskilde som forstyrrer opptaket. (Mest sannsynlig var det lyskasteren som gjenspeiles for sterkt på bakgrunnen.)



Figur 4-13 Test 1 fra 20.11.06 – avstand til bakgrunn noe over 3 meter – visualisering vha Matlab

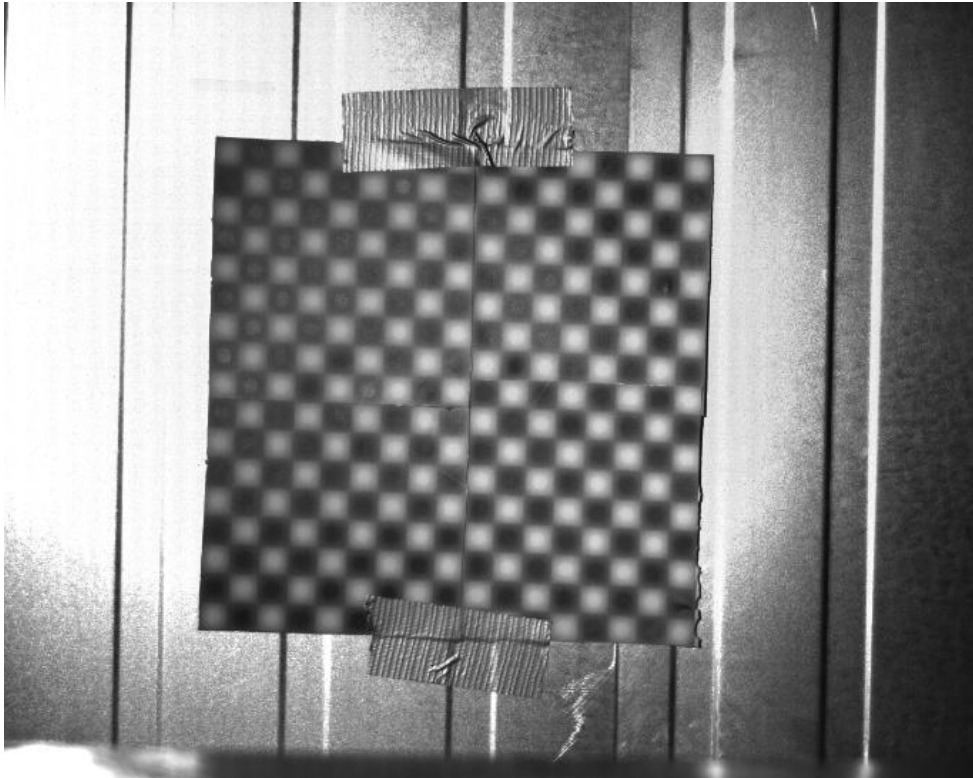
4.3.3.2 Test 2 – lyskilde 1,5 meter unna, visualisering i Matlab.

Lyskilden i test 2 sto 1,5 meter unna. Denne testen ble også visualisert i Matlab, men denne avstanden ble ved en feil gjort med referansebildet fra tidligere opptak. Dette ga et "avtrykk" på filmen der bordet hadde stått før med samme fargetoner som en varmekilde. Dermed kunne filmen ikke brukes.

4.3.3.3 Test 3 – linse konfigurert for 3 meters avstand til fokuseringspunktet.

Avstand til bakgrunn var 2 meter unna. Lyskilden sto 1 meter unna, mens linse sto konfigurert for 3 meters avstand til fokuseringspunktet. Se figur 4-14.

En av feilkildene ved disse testene kan ha vært unøyaktig avstandsmåling.



Figur 4-14 Test 3 fra 20.11.06 – Bakgrunn 2 meter unna

4.3.3.3.1 Beregning av optimale verdier fra forsøket 20.11.06

Dimensjonen for bakgrunns mønsteret brukt i dette forsøket var det største:

Hele bakgrunn var 30 cm – 300 mm lang. Det var $\sim 1,76$ cm – 17,6 mm fra prikk til prikk på bakgrunnen. Linsens brennvidde var 50 mm.

Bruker disse opplysningene til å regne ut optimale verdier for testene.

$$e_{optimal} = \frac{FAH}{\frac{f}{f_{\#}} + FAH} :$$

$$e_{optimal} = \frac{17,6mm}{2,8 + 17,6mm}$$

$$e_{opt} \approx \underline{0,863}$$

Optimal oppløsning A blir:

$$A = e_{optimal} * \frac{f}{f_{\#}}$$

$$A = 0,863 * 2,8$$

$$A = A_{opt} \approx \underline{2,42}$$

Optimal avstand fra bakgrunn til varmekilde i test 1 og 2 blir:

$$e = \frac{z}{P}$$

$$\rightarrow z = P * e$$

$$z = 3000 \text{ mm} * 0,863$$

$$z = z_{opt} = 2589 \text{ mm} = \underline{2,589 \text{ m}}$$

Optimal avstand fra bakgrunn til varmekilde i test 3 blir:

$$e = \frac{z}{P}$$

$$\rightarrow z = P * e$$

$$z = 2000 \text{ mm} * 0,863$$

$$z = z_{opt} = 1726 \text{ mm} = \underline{1,726 \text{ m}}$$

Tabell 4-3 Nye forsøk m/stearinlys fra 20.11.06

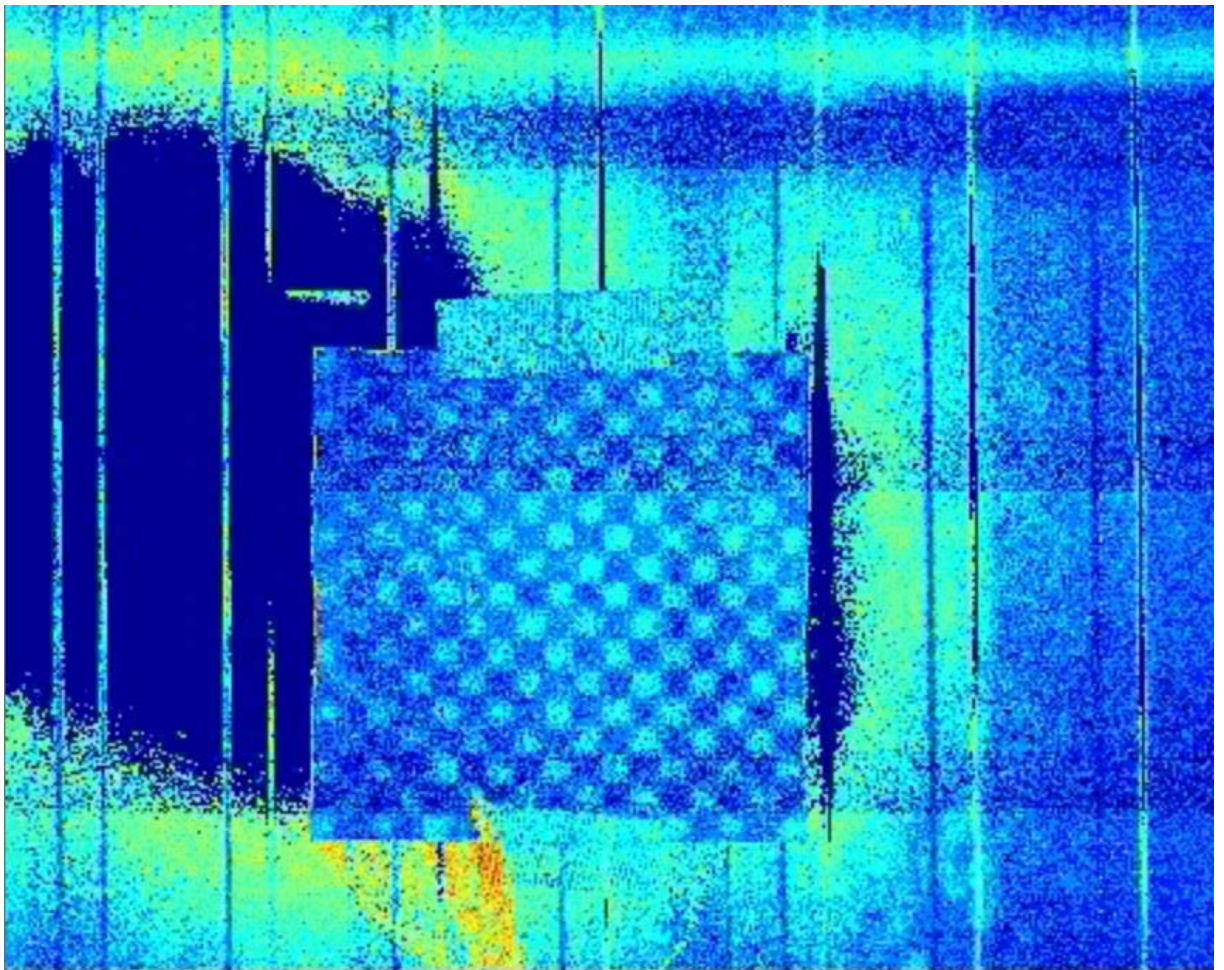
	Bilde- frekvens	Eksp, tid	e_{opt}	Z	Z_{opt}	Avstand P	Kommentar
Test nr. 1	250 Hz	2584 μ s	0,863	0,08 m	2,589 m	>3,000 m	Sekundær lyskilde forstyrrer
Test nr. 2	250 Hz	2584 μ s	0,863	2,0 m	2,589 m	>3,000 m	Feil v/ref.bilde
Test nr. 3	250 Hz	2584 μ s	0,863	1,0 m	1,726 m	2,000 m	Unøyaktig avstandsmåling

4.3.4 Forsøk fra 22.01.07

4.3.4.1 Test 1 – Ingen tydelig forskyvning.

Avstanden P (avstanden fra bakgrunn til linsa) var 2,50 meter. Avstand z , (avstand mellom bakgrunn og tetthetsgradienten (objektet)), var 1,25 m. Bildefrekvensen var 500 Hz og eksponeringstiden var 1899 μ s. Lysstyrken lå mellom 2,8 og 1,8.

Ingen tydelig forskyvning ble observert. I tillegg varierte lysforholdene i filmen, muligens grunnet feil i kameraet. Dette gjentok seg med alle åtte testene. Det Matlab- prosesserte bilde fra test 1 ble det mest representative bilde for testene, se figur 4-15.



Figur 4-15 Matlab- prosessert bilde fra test nr.1, 22. januar 2007.

4.3.4.2 Test 2 – Ingen tydelig forskyvning.

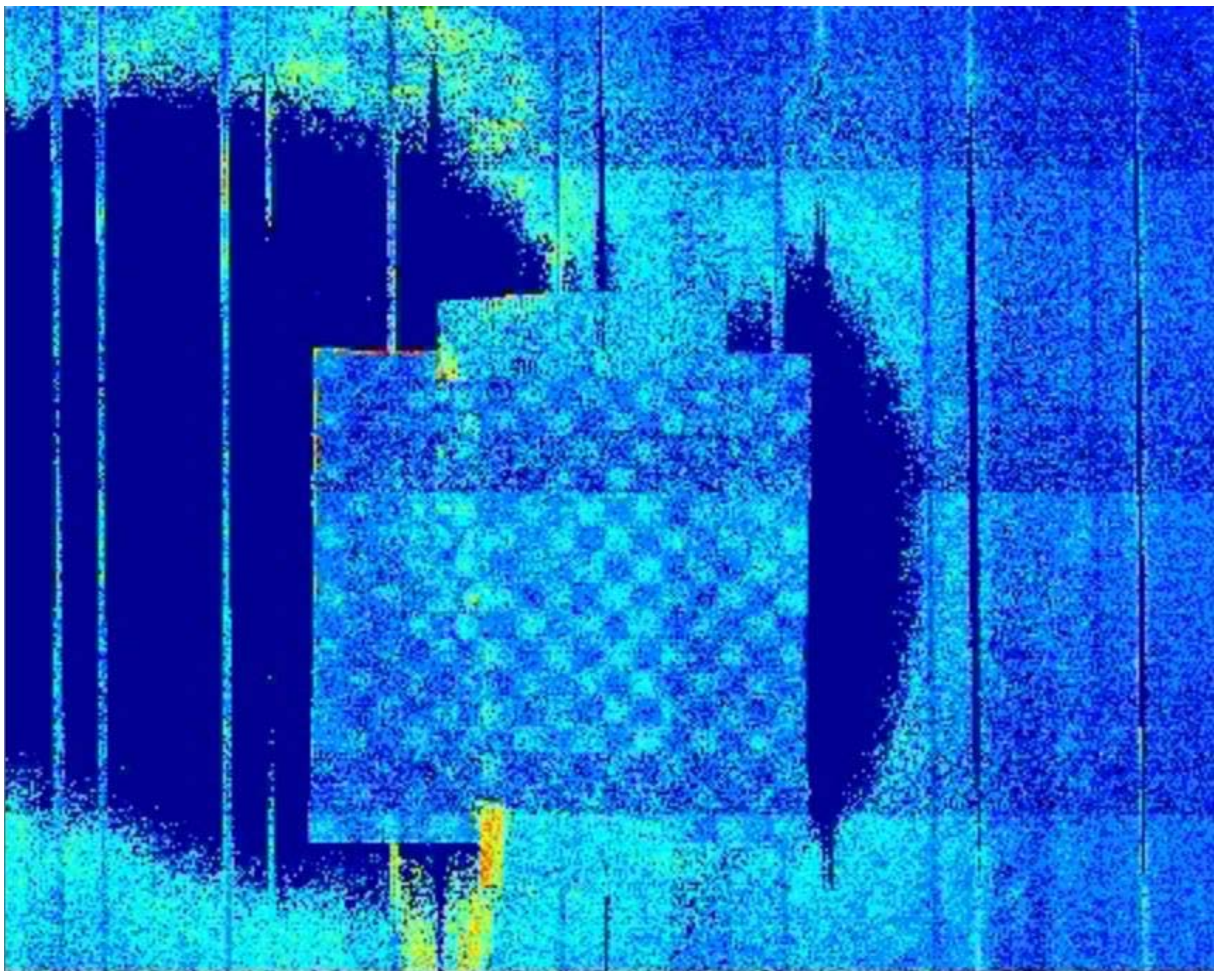
Samme oppsett som i test 1, men bildefrekvensen endret til 250 Hz. Eksponeringstiden var som i test 1, 1899 μ s. Samme resultat som i test 1.

4.3.4.3 Test 3 – Ingen tydelig forskyvning.

Her var eksponeringstiden 1412 μ s og bildefrekvensen endret til 500 Hz. Oppsettet som i test 2 og resultatet var det samme.

4.3.4.4 Test 4 – Svak varmebølge.

Eksponeringstiden 2822 μ s og bildefrekvensen 250 Hz. Oppsett ellers som i test 3. En svak varmebølge kunne observeres over stearinlyset, men var for svak til å kunne nyttiggjøres. Matlab- prosessert bilde fra test 4 ses i figur 4-16.



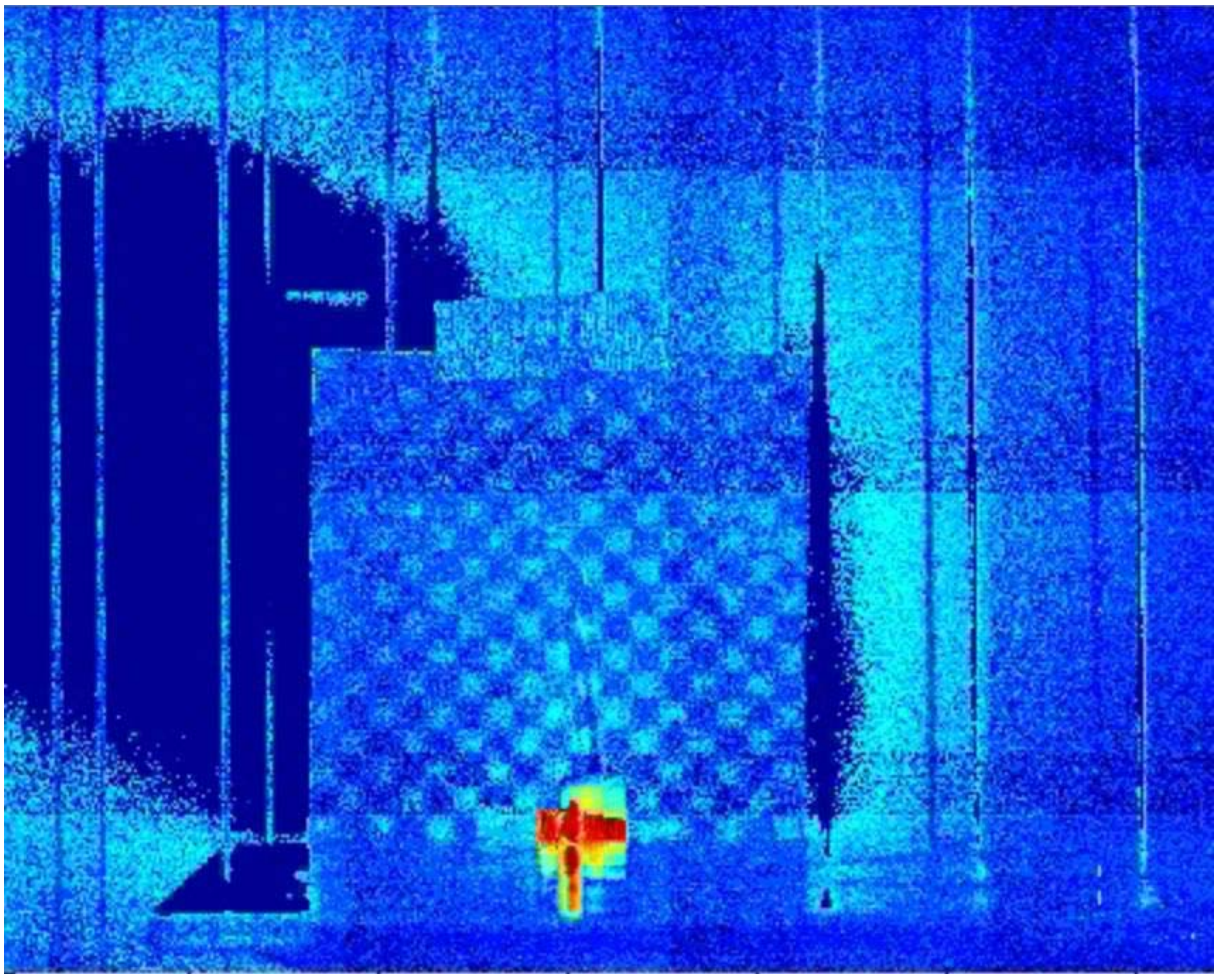
Figur 4-16 Matlab-prosessert bilde fra test nr.4, 22. januar 2007.

4.3.4.5 Test 5 – Observerte ingen varmebølger.

Bildefrekvensen var 500 Hz og eksponeringstiden var $1899 \mu\text{s}$. Avstand z var 0,08 m og avstand P var 2,50 m. Observerte ingen varmebølger.

4.3.4.6 Test 6 – Svak varmebølge observert.

Bildefrekvens var her 250 Hz og eksponeringstiden var $1899 \mu\text{s}$. Samme resultat som i test 4.



Figur 4-17 Matlab-prosessert bilde fra test nr.6, 22. januar 2007.

4.3.4.7 Test 7 – Svak varmebølge kunne observeres.

Bildefrekvens var 500 Hz og eksponeringstid var 1412 μ s. Samme resultat som i test 4 og 6.

4.3.4.8 Test 8 – Ingen tydelige varmebølger ble observert.

Bildefrekvens var 250 Hz og eksponeringstid var 2824 μ s. Ingen tydelige varmebølger ble observert.

4.3.4.8.1 Beregning av optimale verdier fra forsøket 22.01.07.

Brukte også denne gang det største bakgrunns mønsteret.

Hele bakgrunn var 30 cm – 300 mm lang. Det var \sim 1,76 cm – 17,6 mm fra prikk til prikk på bakgrunnen. Linsens brennvidde var 50 mm.

Disse opplysningene ble brukt til å regne ut optimale verdier for forsøket.

$$e_{optimal} = \frac{FAH}{\frac{f}{f_{\#}} + FAH}$$

$$e_{optimal} = \frac{17,6mm}{2,8 + 17,6mm}$$

$$e_{opt} \approx \underline{0,863}$$

Optimal oppløsning A:

$$A = e_{optimal} * \frac{f}{f_{\#}}$$

$$A = 0,863 * 2,8$$

$$A = A_{opt} \approx \underline{2,42}$$

Optimal avstand fra bakgrunn til varmekilde, alle forsøkene:

$$e = \frac{z}{P}$$

$$\rightarrow z = P * e$$

$$z = 2500 \text{ mm} * 0,863$$

$$z = z_{\text{opt}} = 2157,5 \text{ mm} = \underline{2,1575 \text{ m}}$$

Tabell 4-4 Forsøk fra 22.01.07

	Bilde- frekvens	Eksp.tid	e_{opt}	Avstand z	z_{opt}	Avstand P	Kommentar
Test nr. 1	500 Hz	1899 μs	0,863	1,25 m x)	2,1575 m	2,50 m	Ingen tydelig forskyvning
Test nr. 2	250 Hz	1899 μs	0,863	1,25 m x)	2,1575 m	2,50 m	Ingen tydelig forskyvning
Test nr. 3	500 Hz	1412 μs	0,863	1,25 m x)	2,1575 m	2,50 m	Ingen tydelig forskyvning
Test nr. 4	250 Hz	2822 μs	0,863	1,25 m x)	2,1575 m	2,50 m	Svak varmebølge kunne observeres
Test nr. 5	500 Hz	1899 μs	0,863	0,08 m x)	2,1575 m	2,50 m	Observerte ingen varmebølger
Test nr. 6	250 Hz	1899 μs	0,863	0,08 m x)	2,1575 m	2,50 m	Svak varmebølge kunne observeres
Test nr. 7	500 Hz	1412 μs	0,863	0,08 m x)	2,1575 m	2,50 m	Svak varmebølge kunne observeres
Test nr. 8	250 Hz	2824 μs	0,863	0,08 m x)	2,1575 m	2,50 m	Ingen tydelige varmebølger ble observert

x) Når z er mindre enn z_{opt} , inneholder et enkelt forsøksområde opplysning om flere tetthetsgradienter som ikke oppdages ved krysskorrelasjon. Men det er mindre opplysning tilgjengelig sammenliknet med det optimale forholdet hvor $z = z_{\text{opt}}$

4.4 Vurdering av forsøkene i kap. 4.3.

Av bakgrunnsmønstrene som ble brukt var det klart at mindre prikker på mønsteret bidro til en tydeligere visualisering med Matlab, hvor det var lettere å se forskyvninger grunnet defleksjon av lysstråler i gassmediumet.

Mønstre med store prikker viste varmbølgene svært dårlig, og bare filmer hvor lyskilden var svært nær bakgrunnen klarte å vise bølger mot bakgrunnen i Matlab, men disse var altfor svake til å være til nytte i grundigere undersøkelser.

Endring i bildefrekvens og eksponeringstid viste seg å ikke ha særlig å si i forhold til typen mønster som ble brukt som bakgrunn og avstanden til kamera.

5 EKSPERIMENTER MED SPREDNING OG ANTENNING AV HYDROGEN VISUALISERT VED BOS FOTOGRAFERING

5.1 Oppsettet for eksperimentet den 16.02.07



Figur 5-1 Hydrogenoppsett fra 16. februar 2007.

1) Dyse

Til hydrogenforsøkene ble det benyttet en dyse med indre diameter på 8 mm, som var koplet til en hydrogenbeholder via en slange.

2) Avtrekk

Dysen var plassert under et avtrekk, slik at hydrogengassen ikke skulle spres ut i forsøksområdet og være til fare for deltakerne.

3) Hydrogenbeholder

Hydrogenbeholderen tilførte hydrogengass til dysen under forsøkene. Baktrykket ut fra beholderen var på 1.5 bar under all forsøkene.

4) Rotameter

Et rotameter regulerte strømmen av hydrogengass fra beholderen fram til dysen. To rotametre, nr. 2 og 3, ble brukt under forsøkene.

5) Bakgrunn

Bakgrunnen som ble brukt hadde det nest største prikkmønsteret, fordi dette hadde vist seg å gi gode bilder under forsøkene med stearinlys.

6) High Speed HS-3 kamera

Samme kamera ble brukt som under tidligere forsøk.

7) Dedacool lyskaster

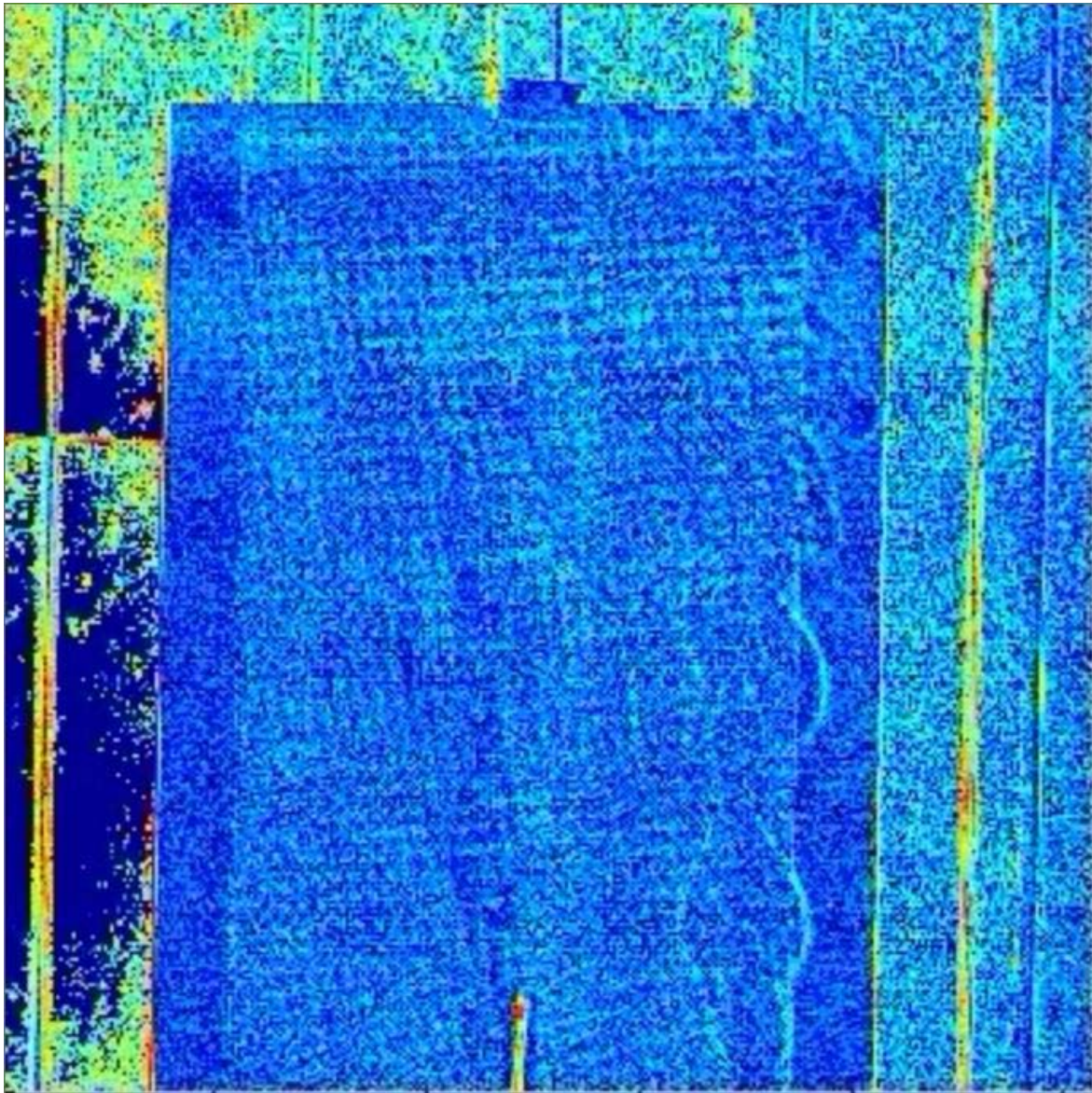
Samme lyskaster som tidligere.

8) MotionPro X Studio

Dette dataprogrammet ble brukt til å styre kameraet og lagre filmene via en bærbar pc.

5.2 Forsøket med Hydrogen fra 16.02.07

5.2.1 Test 1 – Varmebølger og shadowgraph kunne observeres



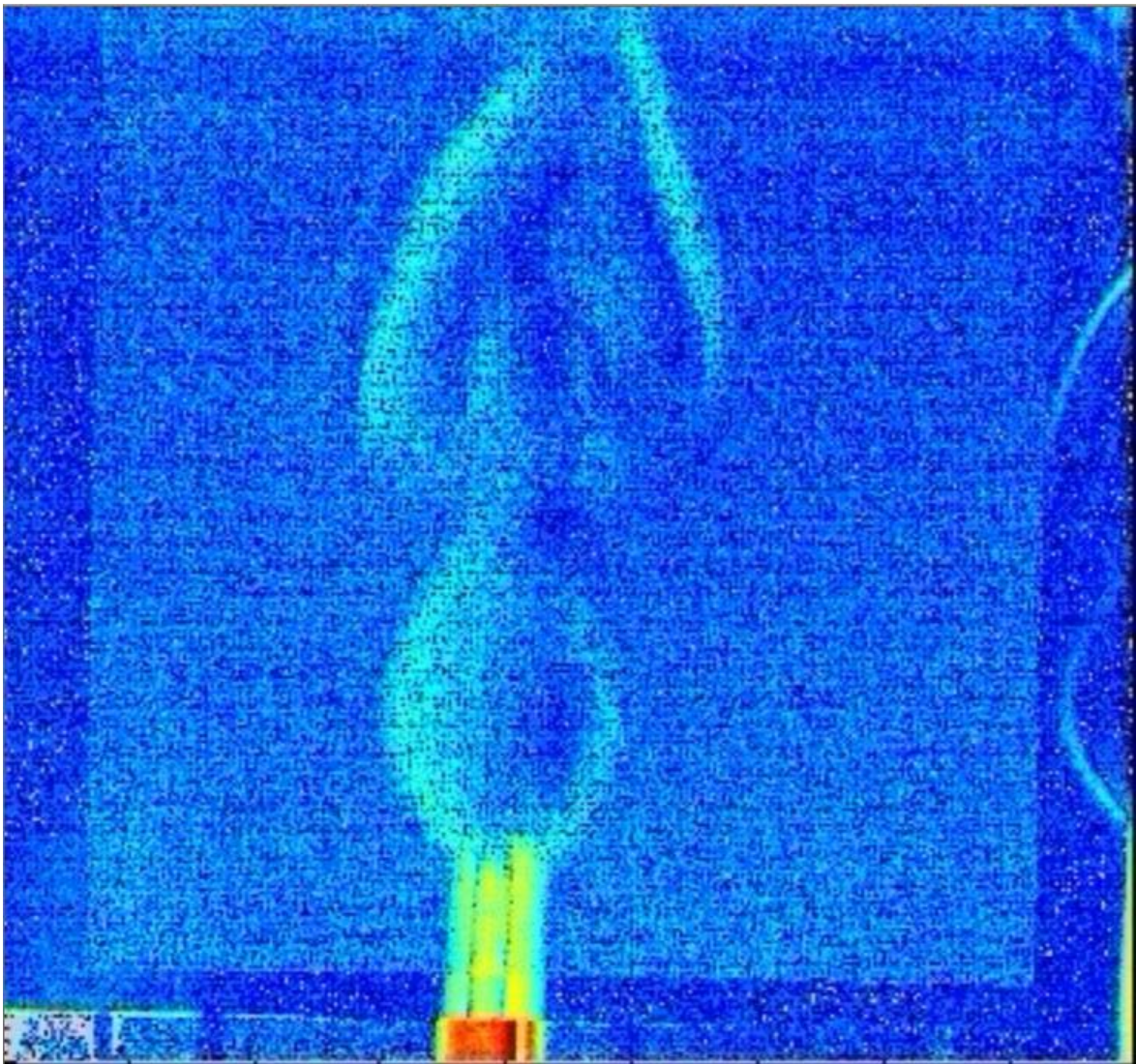
Figur 5-2 Matlab-prosessert bilde fra test 1 den 16.02.07

Det første forsøket ble foretatt med kamera fire meter unna bakgrunnen, midtpunktet av kameralinsen 112,5 cm over bakken, like høyt som midtpunktet av bakgrunnen, og med midtpunktet av lyskasteren 137 cm over bakken. Oppløsningen på bildet var på 512x512 piksler, bildefrekvensen var på 1000 Hz, lysstyrken var på 2,8 lik resten av forsøkene og eksponeringstiden var på 816 μ s.

Baktrykket fra hydrogentanken var på 1,5 bar, dette ble holdt konstant i resten av forsøkene. Rotameter nr. 3 ble benyttet og var innstilt på 100 % åpning. I de syv første forsøkene ble hydrogenstrømmen antent og flammen fikk stabilisert seg før filmene ble tatt.

Varmeølger kunne observeres mot bakgrunnen, i tillegg til en tydelig shadowgraph (skyggebilde) som var synlig på siden av hvert bilde.

5.2.2 Test 2 – Varmeølger observert



Figur 5-3 Matlab-prosessert bilde fra test 2 den 16.02.07

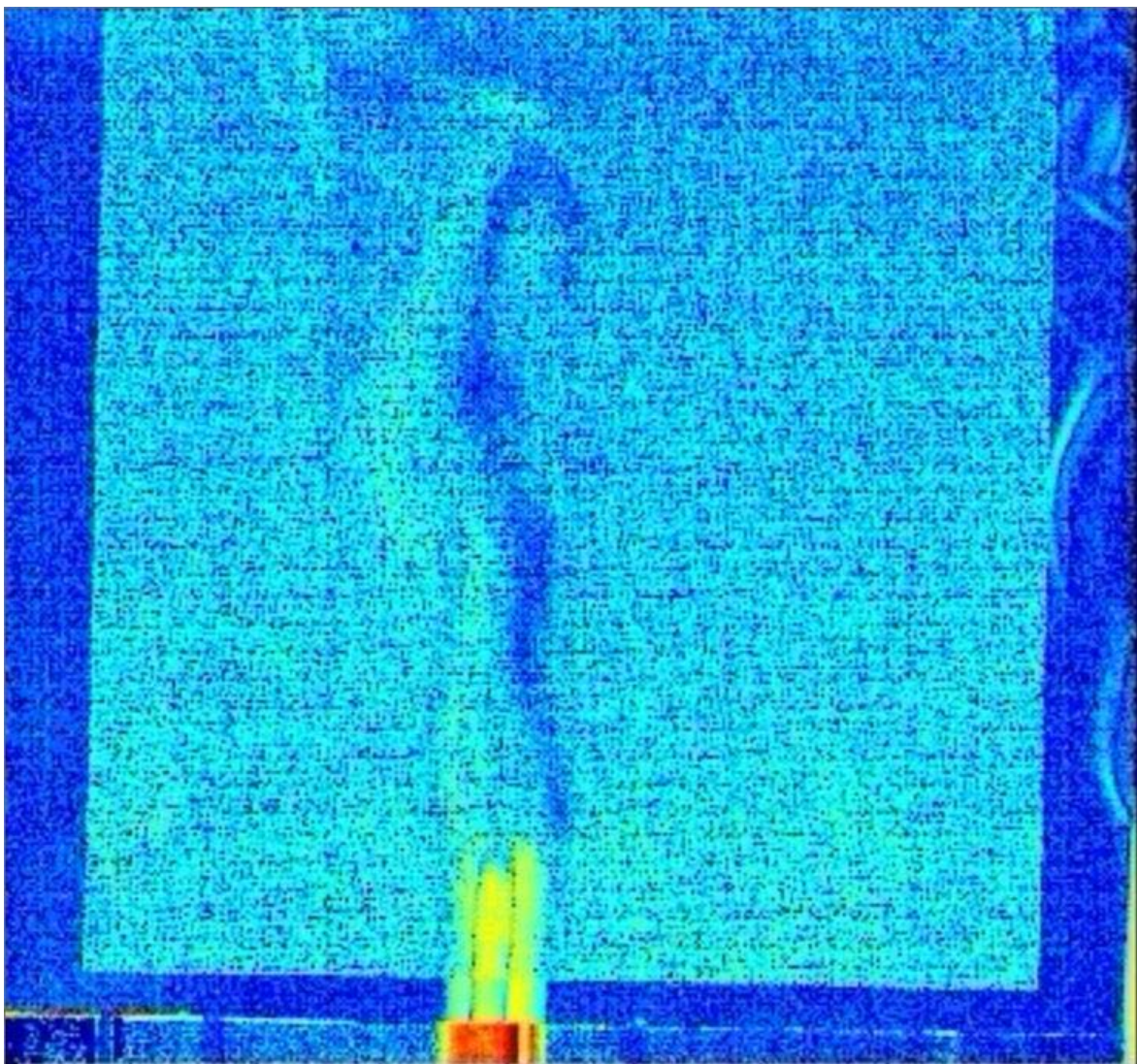
Her ble kameraet flyttet til en avstand av 1,4 m fra bakgrunnen.

Forsøket hadde både kameraet og lyskasterens midtpunkt 112,5 cm over bakken, hvilket forble uendret i resten av forsøkene.

Bildeoppløsningen ble endret til 892x836 piksler, for at filmene skulle få med mer av selve bakgrunsmønsteret og mindre av veggen rundt. Dette forble uendret i resten av forsøkene. Eksponeringstiden ble økt til 951 μ s for å få med mer av lyset på hvert bilde og bildefrekvensen minket dermed til 740 Hz. Rotameter 3 ble brukt og åpningen var igjen på 100 %.

Tydelige varmebølger ble observert og så ut til å bevege seg i "støt" opp fra dysen.

5.2.3 Test 3 – Varmebølger med virveldannelse.



Figur 5-4 Matlab-prosessert bilde fra test 3 fra den 16.02.07

Fra dette forsøket og til siste forsøk, ble kun rotameter innstillingene og rotameter typene endret. Rotameter 3 ble brukt med 50 % åpning.

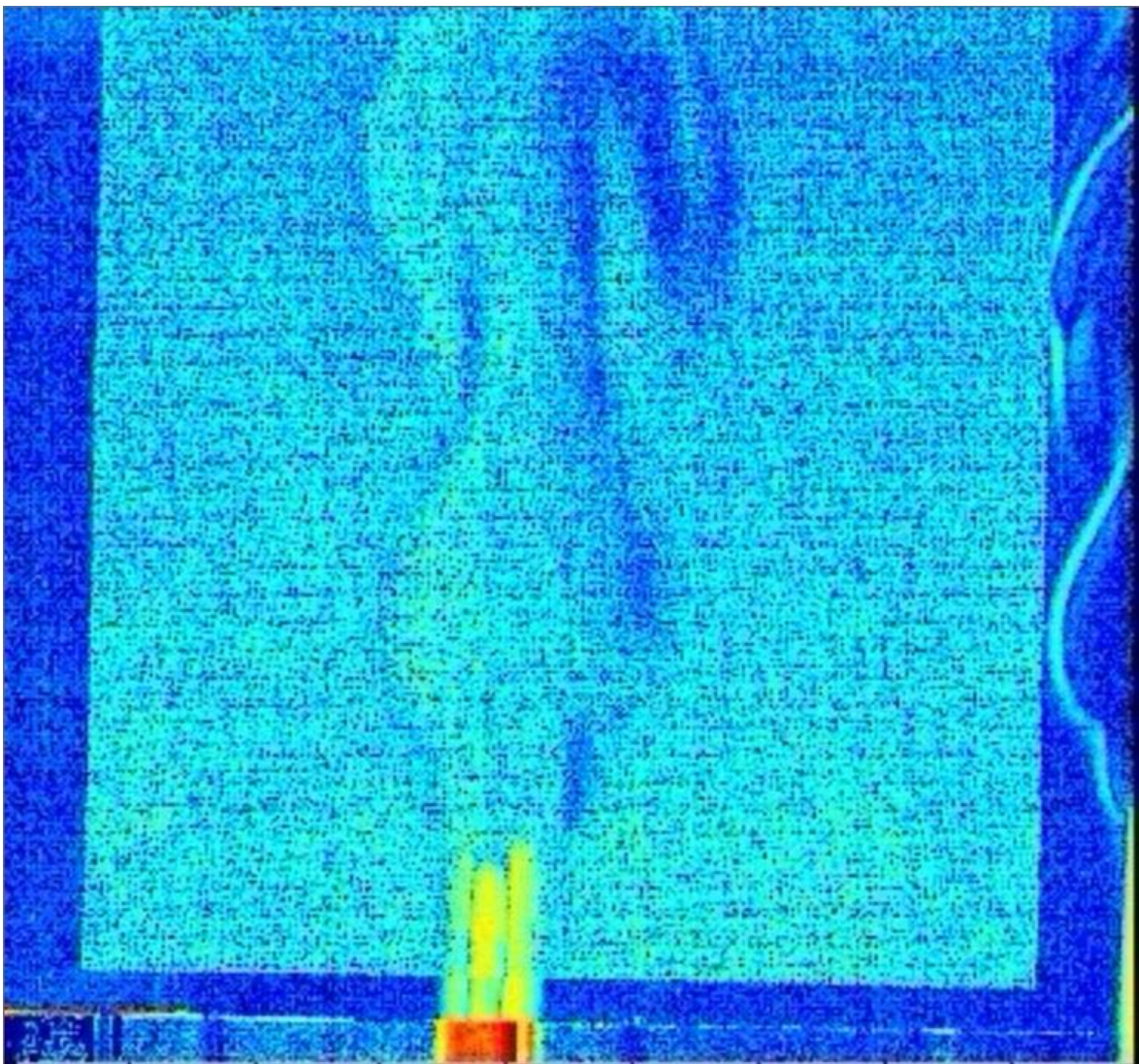
Litt turbulente varmebølger observert med virveldannelse nær toppen av bildet.

5.2.4 Test 4 – Tynn laminær strøm

Rotameter 3 ble brukt med 20 % åpning.

En lang og tynn varmestrøm ble observert med virveldannelse nær toppen av bildet. Virveldannelsen kom klarest frem på skyggebildet på siden.

5.2.5 Test 5 – Varmeølger observert

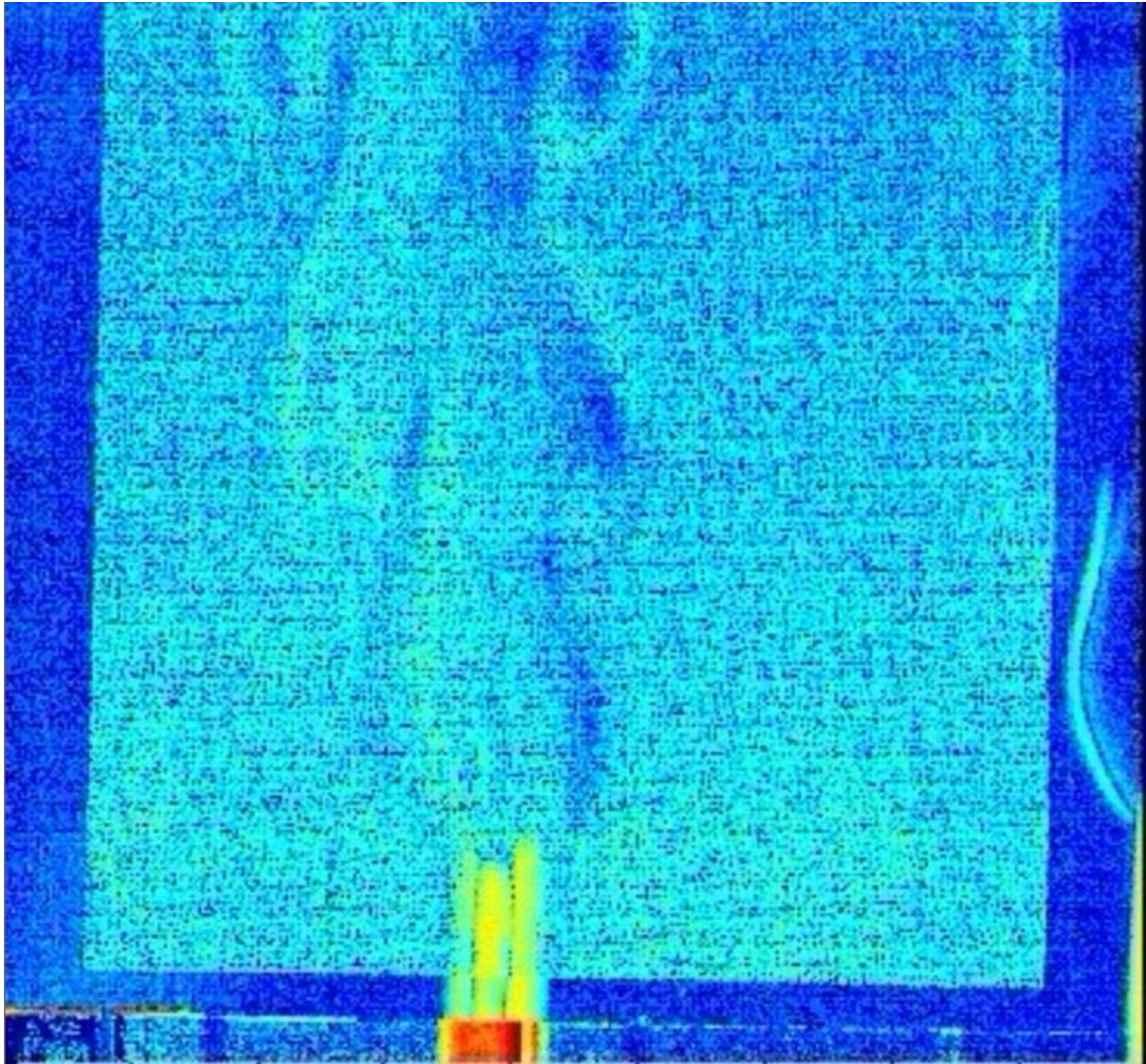


Figur 5-5 Matlab-prosessert bilde fra test 5 fra den 16.02.07

Under forsøket ble rotameter 2 brukt med 50 % åpning.

Varmebølger observert lik dem i forsøk 2, men mindre tydelige.

5.2.6 Test 6 – Svakere visualisering enn test 5.

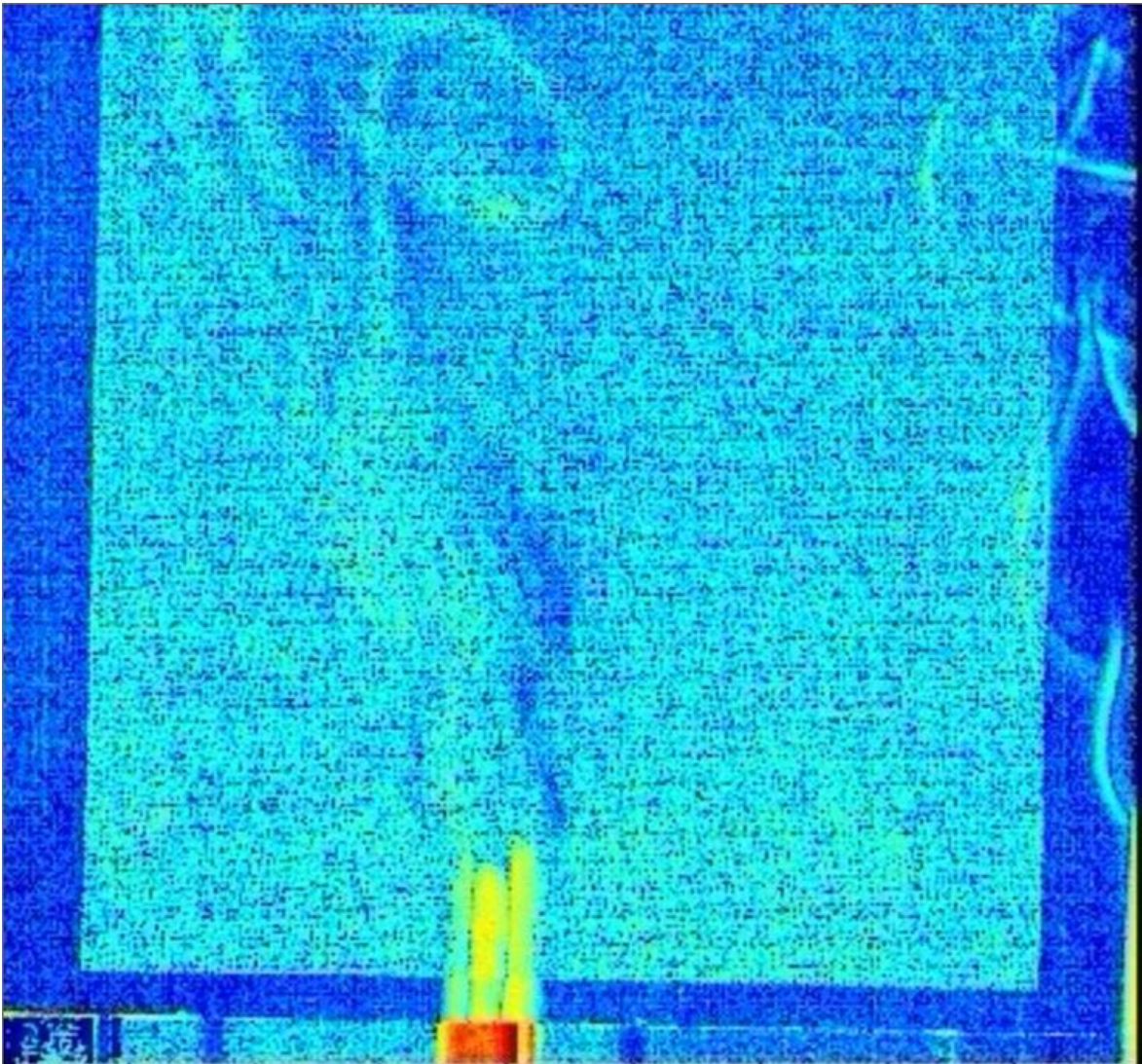


Figur 5-6 Matlab-prosessert bilde fra test nr. 6 fra den 16.02.07

Under forsøket ble rotameter 2 brukt med 100 % åpning.

Varmebølger observert lik dem i forsøk 2, men mindre tydelige, nesten mer utydelige enn i forsøk 5.

5.2.7 Test 7- Bølgebevegelse, men med virvler.



Figur 5-7 Matlab-prosessert bilde fra test nr. 7 fra den 16.02.07

Rotameter 2 brukt med 20 % åpning.

Svakere varmebølger med større virveldannelse på filmen.

5.2.8 Test 8 – Tynn laminær varmebølge.

Fra dette forsøket og til det siste ble gassen ikke antent manuelt. Rotameter 2 ble brukt med 20 % åpning.

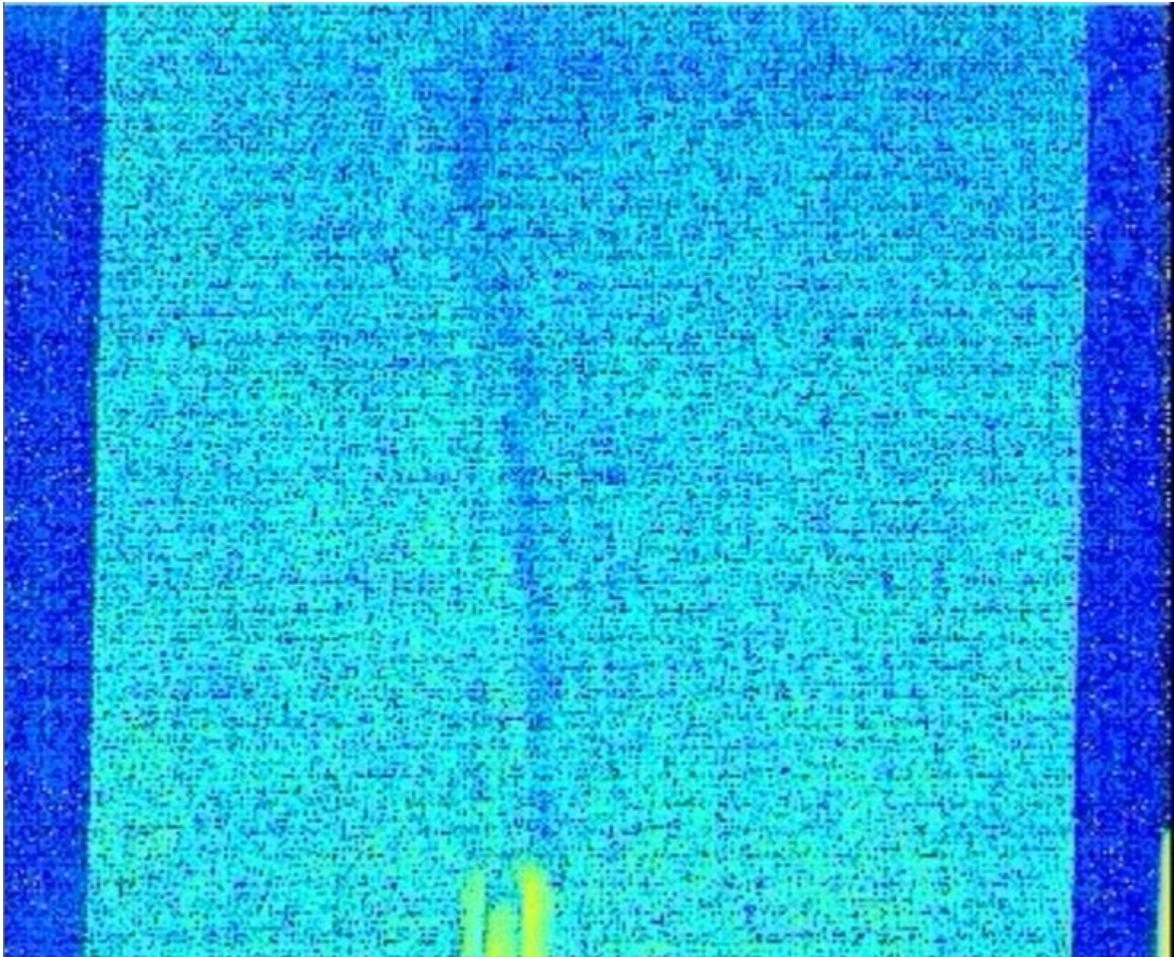
En høy, tynn, laminær gasstrøm ble observert.

5.2.9 Test 9 – Utydelig visualisering.

Rotameter 2 brukt med 50 % åpning.

Gasstrømmen kunne bortimot ikke sees på bildet.

5.2.10 Test 10 – Tynn varmebølge i bevegelse.



Figur 5-8 Matlab-prosessert bilde fra test 10 fra 16.02.07

Rotameter 2 brukt med 100 % åpning.

Gasstrømmen var tynn, men hadde bølgebevegelse nær toppen av bildet.

5.2.11 Test 11 – Antydning til mer bevegelse.

Rotameter 3 ble nå brukt, med 100 % åpning.
Gasstrømmen kunne ikke sees klart på filmen.

5.2.12 Test 12 – Utydelig, så ingen bevegelse.

Rotameter 3 brukt med 50 % åpning.
Gasstrømmen kunne ikke sees klart på filmen.

5.2.13 Test 13 – Ingen bevegelse.

Rotameter 3 brukt med 20 % åpning.
Gasstrømmen kunne ikke sees klart på filmen.

5.2.14 Beregning av optimale forhold ved forsøket den 16.02.07

Siden samme mønster ble brukt som under forsøkene den 10.10.06, ble optimalt forhold e og optimal oppløsning A , de samme:

$$e_{optimal} = \frac{FAH}{\frac{f}{f_{\#}} + FAH}$$

$$e_{optimal} = \frac{0,9mm}{2,8 + 0,9mm}$$

$$e_{opt} \approx \underline{0,243}$$

$$A = e_{optimal} * \frac{f}{f_{\#}}$$

$$A = 0,243 * 2,8$$

$$A = A_{opt} \approx \underline{0,68}$$

Siden det ble valgt å ha dysen under et avtrekk og 0,4 meter fra bakgrunnen, ble denne avstanden brukt som "optimal" og tilsvarende avstand til kamera ble beregnet:

Optimal avstand fra bakgrunn til varmekilde i testene 1 til 3 var:

$$e = \frac{z}{P}$$

$$\rightarrow P = \frac{z}{e}$$

$$P = \frac{0,400m}{0,243} \approx 1,646 \text{ m}$$

Den optimale avstanden til kamera ble ikke benyttet, da den eksakte størrelsen til hvert punkt i bakgrunns mønsteret, FAH, ikke kunne fastslås. En avstand på 1,4 meter fra kamera til bakgrunn ble vurdert som nærmest nok.

Det første forsøket med en avstand på 4,0 meter mellom bakgrunn og kamera oppsto på grunn av en regnefeil, men ble brukt for å teste klarheten på bildet på en slik avstand.

5.2.15 Beregning av massestrøm fra forsøket med hydrogen den 16.02.07

På grunn av lavt baktrykk (1,5 bar), kan ideell gasslov benyttes:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$\Rightarrow m = \frac{M_w \cdot p \cdot V}{R \cdot T}$$

Hvor M_w er hydrogenets molvekt på 1,008 g/mol og en antar at T er romtemperatur (298 K) i gassflasken.

For rotameter 3:

Ved 100% åpning og 2,133 l/min i volumstrøm:

$$m_{H_2} = \frac{2 \cdot 1,008 \text{ g/mol} \cdot 1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 2,133 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}}{8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \cdot 298 \text{ K}} = \underline{0,26 \text{ g/min}}$$

Ved 50% åpning og 0,857 l/min:

$$\Rightarrow m_{H_2} = \underline{0,104 \text{ g/min}}$$

Ved 20% åpning og 0,296 l/min:

$$\Rightarrow m_{H_2} = \underline{0,036 \text{ g/min}}$$

For rotameter 2:

Ved 100% åpning og 9,474 l/min:

$$\Rightarrow m_{H_2} = \underline{1,156 \text{ g/min}}$$

Ved 50% åpning:

Bruker tilnærmede lineære forhold for å regne ut volumstrøm ved 50%:

$$Y = 0,0955 \cdot 50 - 0,1088 = \underline{4,6662 \text{ l/min}}$$

$$\Rightarrow m_{H_2} = \underline{0,57 \text{ g/min}}$$

Ved 20% åpning og 1,741 l/min:

$$\Rightarrow m_{H_2} = \underline{0,212 \text{ g/min}}$$

5.2.16 Oppsummering av forsøket fra 16.02.07

Siden første forsøk ble mer eller mindre foretatt som en test på kameraets evne til å fange opp mønsteret uten zoomlinse (zoomlinse ble utprøvd, men fortsatte med samme linse som i de tidligere forsøkene), ble ikke resultatet optimalt, men et mønster kunne skilles ut på vanlig film og det ble observert en tydelig Schlieren-effekt etter prosessering i Matlab, i tillegg til et skyggebilde på siden av bakgrunnen som viste gasstrømmens bevegelser nesten bedre enn BOS effekten.

Fra og med forsøk 2 ble det gjort mer uniforme forsøk, hvor varmebølgene kom tydeligere fram etter som hvor stor andel av rotameteret var åpent. I tillegg, hadde varmebølgene en pulslignende bevegelse som ble mer tydelig desto større massestrøm det var gjennom dysen.

Forklaringen på dette kan være at siden massestrømmen ut av dysen økte når åpningen i rotameteret ble større, ble det mer hydrogen tilgjengelig som reagerte med oksygen, noe som førte til et tomrom som raskt ble fylt med utenforliggende luft etter som gassen steg oppover.

Et mulig unntak til økning i tetthetsgradienter når massestrømmen økte, kan komme av feil ved apparatet. Problemer med rotameter 2 ble påpekt når dette ble brukt og det var her det tilsynelatende var en svakere varmebølge ved 100 % åpning enn ved mindre åpninger.

Virveldannelsen som ble større når massestrømmene ble mindre, kan forstås ved lettere forstyrrelse og spredning fra luft, desto mindre gass som var tilgjengelig til å reagere.

Siden de fleste filmene fra målinger med rotameter 3 hvor hydrogengassen ikke var antent på forhånd, ikke viste noen Schlieren-effekt, kan det ikke ha skjedd noen antenner i gassen ellers, som ville ha økt temperaturen og vist seg etter Matlab prosessering. Det fantes noen tynne varmestrømmer på filmer fra rotameter 2 som kan tyde på forhold som lå til rette for antenning, men siden en av tre ikke viste noen effekt og rotameter 2 hadde mulige feil, burde dette sjekkes igjen.

Tabell 5-1 Resultater fra forsøk med Hydrogen 16.02.07

	Linse- fokus (m)	Bilde- frekvens (Hz)	Eksp.- tid (μ s)	Lys- styrke (f/)	Rota- meter (nr.)	Rota- meter Inn- stilling (%)	Tenning	Avstand P (m)	Avstand Z (m)	Resultat
Test 1	4,0	1000	816	2,8	3	100	Ja	4,0	0,40	Varmebølger og shadowgraph kunne observeres.
Test 2	1,4	740	951	2,8	3	100	Ja	1,40	0,40	Varmebølger observert.
Test 3	1,4	740	951	2,8	3	50	Ja	1,40	0,40	Varmebølge med virveldannelse.
Test 4	1,4	740	951	2,8	3	20	Ja	1,40	0,40	Tynn, laminær strøm med bølger nær toppen.
Test 5	1,4	740	951	2,8	2	50	Ja	1,40	0,40	Samme som test 1 og 2
Test 6	1,4	740	951	2,8	2	100	Ja	1,40	0,40	Samme som over, men svakere visualisering.
Test 7	1,4	740	951	2,8	2	20	Ja	1,40	0,40	Bølgebevegelse, men med virvler.
Test 8	1,4	740	951	2,8	2	20	Nei	1,40	0,40	Utydelig visualisering, tynn laminær varmebølge.
Test 9	1,4	740	951	2,8	2	50	Nei	1,40	0,40	Utydelig visualisering, tynn varmebølge med så vidt synlig bevegelse.
Test 10	1,4	740	951	2,8	2	100	Nei	1,40	0,40	Tynn varmebølge i bevegelse.
Test 11	1,4	740	951	2,8	3	100	Nei	1,40	0,40	Svak visualisering. Antydning til mer bevegelse i varmebølgen.
Test 12	1,4	740	951	2,8	3	50	Nei	1,40	0,40	For utydelig til å se noen bevegelse.
Test 13	1,4	740	951	2,8	3	20	Nei	1,40	0,40	For utydelig til å se noen bevegelse.

6 OPTIMALE FORHOLD FOR BOS-FOTOGRAFERING

Gjennom forsøkene som er blitt foretatt under dette prosjektet, har avstanden mellom kamera, forsøksobjektet og bakgrunn hatt stor betydning for hvor gode resultatene ble på film.

De fleste forsøkene eksperimenterte med avstander før de optimale beregningene ble gjort, men viste at desto nærmere avstanden mellom kamera og bakgrunn og mellom bakgrunn og forsøksobjektet var til det optimale, desto klarere ble filmene og desto tydeligere kunne tetthetsgradientene oppfattes.

Av bakgrunnene viste det seg å fungere bra med et prikkmønster rundt 1 mm per prikk, enn det gjorde med større mønstre. Tetthetsgradientene kom klart til syne under eksperimenter med 1 mm prikkmønsteret, mens det ikke ble observert tydelige gradienter når mønsteret hadde prikker med diameter 17,6 mm. Det eneste i dette tilfellet var flammen direkte rundt lyskilden, hvor endringen i tetthet var stor nok til å kunne observeres.

Det virket som om slike store mønstre også bidro til lysforstyrrelser på filmene. Med økt prikkstørrelse på glatt papir kan det ha vært mer lys som ble reflektert inn i kameralinsen og forstyrret målingene. Det kan også ha vært problemer med kameraet som ble brukt, noe som ble påpekt som en mulighet av utleieren.

Et annet problem med et større mønster er også knyttet til måten forsøkene ble utført på. Til tross for at beregninger viste at varmekilden ideelt sett burde vært mye nærmere kamera når det største mønsteret ble brukt som bakgrunn, ble dette ikke fulgt opp, grunnet faren forbundet med hydrogen i de senere forsøkene. Under forhold med større sikkerhetstiltak, kan det derimot være mulig å bruke en slik bakgrunn, men dette falt utenfor omfanget av prosjektet.

Av andre faktorer kan nevnes lysstyrken, som oftest fungerte bra ved innstillinger rundt forholdstallet 2,8. Dette er for forsøk i laboratoriet hvor avstandene ikke overskred mer enn noen meter, og er dermed mest relevant for forsøk av mindre skala. Andre forhold, som bildefrekvens og eksponeringstid, hadde relativt lite å si under eksperimentene, annet enn at de fungerte greit ved de respektive intervaller 250-500 Hz og 1900-2600 μ s.

7 FEILKILDER

- Av feilkilder kan kameraoppsettet nevnes som en særdeles viktig faktor. Ved både plassering av selve kameraet i forhold til bakgrunn og utslippskilde og ved fokusering av kameralinsen, kan det gjøres feil som resulterer i unøyaktige målinger og/eller feil evaluering av data. Avstander fra kamera til bakgrunn og fra utslippskilde til bakgrunn benyttes i beregning av optimale fokuseringsavstander, som igjen leder til best mulig oppløsning, og må dermed måles så nøyaktig som mulig.
- Blenderen i kameraet er også en mulig feilkilde, da den kan justeres til å slippe inn forskjellige mengder lys per bilde, noe som kan føre til tap av informasjon hvis denne er justert feil. Justeringen av kameraets bildefrekvens er også viktig, da en for høy frekvens fører til for lite tid på å ta hvert bilde, og kan lede til mindre informasjon som totalt kommer fram i filmen.
- Lyskasteren som benyttes for å få bakgrunns mønsteret godt fram på hvert bilde, må justeres, og det kan føre til mulig blanding av mønsteret ved refleksjon inn i linsen, hvis ikke dette gjøres ordentlig. Kommer ikke mønsteret godt fram, kan det føre til ufullstendig oversikt over alle endringene som finner sted når lyset bøyes av.
- I tillegg bør lyskasteren være plassert slik at lysstrålene går mest mulig parallelt i samme retning som kameralinsen peker. Dette for å hindre at bildet som når kameraet, ikke er forstyrret ved andre faktorer enn gassen. For eksempel, hvis lyskasteren står høyere over bakken enn kameraet og lyser skrått på forsøksområdet, kan objektet foran kamera virke bredere og kortere enn hvis lyset skinner horisontalt og i samme retning som kameralinsen. Siden lyskasteren sto skrått i forhold til kamera i alle forsøkene, er denne feilkilden aktuell.
- Varmekilden foran kamera kan også forårsake dårlige resultater, hvis den ikke klarer å simulere de realistiske forholdene rundt ekte utslippsulykker. Det ble for eksempel brukt et stearinlys under tidlige forsøk, som av og til ikke produserte mer enn en laminær strømning som fungerte dårlig som forsøksobjekt.

- Avtrekket brukt under forsøkene med hydrogen er en feilkilde med tanke på hvor realistisk forsøkene skulle være. Det trekker hydrogenstrømmen til seg for sikkerhetsmessige årsaker, men under naturlige forhold vil det ikke nødvendigvis være noe liknende som trekker på hydrogenet, og dermed minker graden av realisme.
- Det er alltid en mulighet for at hydrogentanken ikke var helt tett, og noe hydrogen kan ha havnet i slangen koplet til tanken og dysen før hvert forsøk. Dette ville ført til mer hydrogen ut av dysen enn beregnet.
- I tillegg kunne det være feil på rotameteret som regulerte strømmen av hydrogen til dysen. Rotameter nr. 2 så ut til å ikke fungere helt som det skulle, noe som kunne føre til feil mengde hydrogen gjennom dysen. Dette så ut til å bli bekreftet under målinger med rotameteret, hvor feil på apparatet kan ha produsert en mindre Schlieren-effekt enn forventet.
- Med hensyn til datamaskinen som benyttes til å prosessere og lagre forsøksbildene, må en være påpasselig med å lagre i rett filtype. En filtype som komprimerer filmen, kan føre til at store mengder informasjon blir borte, hvis forskjellene fra bilde til bilde er vanskelige å få øye på.
- Menneskelige feil er også tilstedeværende, siden mye visuell informasjon står sentralt i forsøkene og tolkning av dette kan variere fra person til person.

8 FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

Mer avanserte forsøk er nødvendig for å bedre fastslå massen til strømmer av hydrogengass, med utplassering av forskjellige sensorer (trykk, temperatur etc.) for å få bedre oversikt over hvilke forhold som styrer form, bevegelse og diffusjon av gassen og hvordan disse kan benyttes i mer avanserte beregninger.

I sammenheng med dette, kan det være interessant å finne ut hvor mye av tetthetsgradientene som representerer reagerende gass og hvor mye som representerer inert nitrogen og luft som varmes opp av reaksjonene. Eventuelt, hvordan disse kan skilles ut fra utslagene til hydrogen.

Muligens vil det være bedre med flere forsøk under mer naturlige forhold, det vil si forhold med færre kunstige elementer, blant annet avtrekksrør som trekker til seg gasstrømmene. Større avstander mellom de tre hovedelementene, kameraet, forsøksobjektet og bakgrunnen, som kun kan gjøres utendørs, vil også dermed være mer aktuelle.

Noe som også vil være aktuelt, er mønstre med større enkeltelementer som ikke egner seg like bra til forsøk i lab. Disse vil kunne gjøre mer nytte under forsøk av større dimensjoner, enn mønstre som fungerer bra under mer begrensede forhold.

Det kan også være verdt å tenke på hvordan lys påvirker forsøksforholdene og at det er verre å stenge ute forstyrrende lyskilder hvis det kjøres mer realistiske forsøk, og ikke minst når det skal foretas undersøkelser under faktiske ulykker. Hvis mulig, gjøre uttesting av mottiltak mot denne typen forstyrrelser.

I tillegg til å la mer av forsøkene foregå under naturlige forhold, kan det også tenkes å bruke hjelpemidler til å simulere mer ekstreme værforhold, som for eksempel kraftigere vind, der det er mulig å få til. Siden skyggebildene bidro til å gjøre noen bevegelser i strømmene tydeligere, kan det også være lurt å vurdere forskjellige forsøksmåter under samme eksperiment der dette er mulig, for å få oversikt over flere detaljer som kan forsvinne ved bruk av bare en metode.

9 KONKLUSJON

Som vist i litteraturstudiet, fines det en rekke praktiske anvendelser av Background Oriented Schlieren fotografering. Prinsippet kan benyttes til å vise bevegelse av luft og andre gasser under ulike forhold og under ulike situasjoner, herunder ulykker med farlige gasser som hydrogen.

Ved forsøkene som er foretatt under dette prosjektet, og som er ment å være del av en større prosess som omhandler utvikling av sikkerhetsanordninger for bruk av hydrogen, har det blitt vist hvordan BOS fotografering kan brukes til praktiske målinger og visualisering av hydrogenflammer.

Dette har vist noen av de bevegelsesmønstre som kan fanges opp ved ulike utslipp, med tanke på forskjellige massestrømmer og deres innvirkning på reaksjonsgassenes bevegelser og samspill med omkringliggende luft.

Diverse innvirkninger på filmkvaliteten er også blitt undersøkt, med en klar innflytelse basert på plassering av de forskjellige elementene i hvert eksperiment. Det har også vært en betydelig innvirkning, hvilken type bakgrunns mønster som ble brukt for å få fram tetthetsgradientene fra et utslipp best mulig. Det er verdt å merke seg at til tross for en type mønster som viste seg å fungere best under forsøkene, så kan andre mønstre med forskjellige størrelser passe til andre skalaer som dette prosjektet ikke omfattet. Dette kan være verdt å merke seg med tanke på framtidige prosjekter i samme kategori.

10 REFERANSELISTE

Elsinga, G.E., Oudheusden van, B.W., Scarano, F., Watt, D.W. (2003) -Assessment and application of quantitative schlieren methods with bi-directional sensitivity : CCS and BOS- Proceedings of PSFVIP-4 –France, p.309-325.

Goldhahn, Erik, Seume, Jörg, (2006) -Background Oriented Schlieren-Technique – Sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field. - 13th Int.Symp. on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, Portugal.

Jensen, Olaf Sven (2003) - Optical Density and Velocity Measurements in Cryogenic Gas Flow - Swiss federal Inst. Of Techn. Zürich, Ph.D-Exam. – p. 24-26, 96-99, 106-109.

Hooke, R., (1665) - Of a New Property in the Air, Micrographia, Observation LVIII, London, p.217-219.

Kähler, C.J., Scholz, U. (2003) - Investigation of laser-induced flow structures with time-resolved. PIV, BOS and IR Technology - 5th Int. Symp. on Particle Image Velocimetry, Korea, p.1-9, 22-24 (Sept., 2003).

Klinge, F., Kirmse, T., Kompenhans J. (2003) - Application of Quantitative Background Oriented Schlieren. Investigation of Wing Tip Vortex in a transonic Wind Tunnel - Proceedings of PSFVIP-4 –France, p. 1-11 – (Juni 3-5. 2003)

Kraftjournalen nr. 6 (2004)

http://www.energiportalen.com/energibanken/kjarkiv/scripts/vis_artikkel.cgi?utgave=20046&artikkel=706

Kunsch, J.P., Rösgen, T. (2006) - Investigation of entrainment and thermal properties of a cryogenic dense-gas cloud using optical measurement techniques

<http://lib.bioinfo.pl/auid:5116262>

Loose, S., Richard, H. Dewhirst, T., Raffel, M. (2000) - Background Oriented Schlieren and Particle Image Velocimetry (PIV) applied for transonic turbine blade investigation - .Inst. für Strömungsmechanik Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Göttingen, Germany , p.1-8.

Mee, David J. and Roesgen , Thomas and Jacobs, Peter A. (2004) - Visualization of Supersonic Flows in Shock Tunnels Using Background Oriented Schlieren-technique - . Australian Aerospace Stud.Conf., - p.1-8 .

NASA JSC White Sands Test Facility. <http://www.wstf.nasa.gov>

Richard, H., Raffel, M., Rein, M., Kompenhans, J., Meier, G.E.A. (2004) - Demonstration of the applicability of a Background Oriented Schlieren-Method. – p- 1-10.

Richard, H., Raffel, M. (2000) – Background Oriented Schlieren Demonstrations - Final report – Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt-Göttingen, Germany – p.1-37.

Settles, Gary S., (2006), High-speed Imaging of Shock Waves, Explosions and Gunshots- A reprint from American Scientist, the magazine of SigmaXi, The Scientific Research Society, USA, p.p. 22-31.

Skornyakova, N.M., Popova, E.M., Rinkevichyus, B.S., Tolkachev, A.V.(2003) - The investigation of heat transfer by Background Oriented Schlieren-Method.-p.1-11.

Skornyakova, N.M., Gambaryan-Roisman, T., Tropea, C., Stephan, P. (2006) - Background Oriented Schlieren Visualization of Marangoni Effect on Microstructured Plates. - 12th Int. Symp. On flow visualization , p. 1-10.

Sommersel, O.K., Bjerketvedt, D., Christensen, S.O., Krest, O., Vaagsaether, K, (2007), Application of Background Oriented Schlieren (BOS) for quantitative measurements of shock waves from explosions – Dep. of Technology, Telemark University College, 1-4.

Toepler, A. (1864) - Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode, Maximilian Cohen und Sohn, Bonn.

Vandiver, Kim (1994)– Gassutslipp visualisert vha Background Oriented Schlieren-teknikk-. Bildmateriell,

Vasudeva Gustav, Honnery Damon R., and Soria Julio. (2005) - Non-intrusive measurement of a density field using the Background Oriented Schlieren method - 4.th Australian Conf. on Laser Diagnostic in Fluid Mechanics and Combustion, p. 137-140.

Venkatakrishnan, L., Meier, G.E.A. (2004) - Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique - DLR Inst. Fluid Göttingen,Germany, p. 237-247.

WikipediA: www.aeromech.usyd.edu.au/aero/super2d/ssflow3.html

11 VEDLEGGSLISTE

- Vedlegg 1 Opprinnelig MATLAB-script (laget av Dag Bjerketvedt)
- Vedlegg 2 Viderebehandling av MATLAB-scriptet fra Dag Bjerketvedt
- Vedlegg 3 Tabeller for de to rotameterne som ble brukt ved forsøket 16.02.07

VEDLEGG 1 Opprinnelig MATLAB script (laget av Dag Bjerketvedt)

```

%
clear
close all

file = ['ImgA08']
filename = file;
fileinfo = aviinfo(filename)
zmax = fileinfo.NumFrames;      % NumFrames
xmax = fileinfo.Width;         % FrameWidth max
ymax = fileinfo.Height;        % FrameHight max

IMzero=[flipud(double(frame2im(aviread(filename,1)))));

file = ['ImgA07']
filename = file;
fileinfo = aviinfo(filename)
zmax = fileinfo.NumFrames;      % NumFrames
xmax = fileinfo.Width;         % FrameWidth max
ymax = fileinfo.Height;        % FrameHight max

% fps= 1000; % (fps)
% dL = 3/1024; %

mov = avifile('BOS3.avi');
% %mov = avifile('T51-001.avi');
mov.Quality = 100;

z = [1 zmax]
x = [1 xmax]
y = [1 ymax]

```

```

IM = [];

for i = 2 : 10

    IM=(flipud(double(frame2im(aviread(filename,i))))));
    S = (IM-IMzero);
    %S = (gradient(gradient(IM-IMzero)));
    %S = (gradient(IM-IMzero));

    mesh(double(1.0.*IM));

    colormap('bone')
    %colormap('jet')
    axis equal;
    VIEW([0 0 1]);

    fg = getframe %
    mov = addframe(mov,fg);

end

mov = close(mov);

```

VEDLEGG 2 Viderebehandling av MATLAB-scriptet fra Dag Bjerketvedt

```

%
clear
close all

file = ['ImgA008.avi']
filename = file;
fileinfo = aviinfo(filename)
zmax = fileinfo.NumFrames;    % NumFrames
xmax = fileinfo.Width;       % FrameWidth max
ymax = fileinfo.Height;      % FrameHight max

IMzero=[flipud(double(frame2im(aviread(filename,1)))));

file = ['ImgA007.avi']
filename = file;
fileinfo = aviinfo(filename)
zmax = fileinfo.NumFrames;    % NumFrames
xmax = fileinfo.Width;       % FrameWidth max
ymax = fileinfo.Height;      % FrameHight max

% fps= 1000; % (fps)
% dL = 3/1024; %

mov = avifile('ImgAff.avi');
% %mov = avifile('T51-001.avi');
mov.Quality = 100;

```

```

z = [1 zmax]
x = [1 xmax]
y = [1 ymax]

IM = [];
for i = 1 : 10

    IM=(flipud(double(frame2im(aviread(filename,i))))));
    S = (IM-IMzero);
    %S = (gradient(gradient(IM-IMzero)));
    %S = (gradient(IM-IMzero));

    mesh(double(1.0.*S));

    colormap('bone')
    %colormap('jet')
    axis equal;
    VIEW([0 0 1]);

    fg = getframe %
    mov = addframe(mov,fg);

end
mov = close(mov);

```

VEDLEGG 3 Tabeller for 2 rotameterer som ble brukt den 16.02.07

Rotameter nr.	Model	Maks. strøm luft [l/min]	Volum strøm H ₂ [l/min]
2	FP-1/8-20-P-3/37-SS18	2.6	9.5
3	FP-1/8-08-P-3/37-BG18	0.7	2.1

Rotameter nr. 2:

Luft:

Prosent	Tid [s]	Volum [l]	Volum strøm [l/min]
0	0	0	0,000
20	54,38	0,5	0,552
40	56	1	1,071
60	38,74	1	1,549
80	28,63	1	2,096
100	45,85	2	2,617

$$Y = 0,026x + 0,0145$$

Hydrogen:

Prosent	Tid [s]	Volum [l]	Volum strøm [l/min]
0	0	0	0,000
20	34,47	1	1,741
40	16,6	1	3,614
60	21,45	2	5,594
80	15,84	2	7,576
100	19	3	9,474

$$Y = 0,0955x - 0,1088$$

Rotameter nr. 3:

Luft:

Prosent	Tid [s]	Volum [l]	Volum strøm [l/min]
0	0	0	0,000
20	400	1	0,150
40	49,96	0,2	0,240
60	84	0,5	0,357
80	116,54	1	0,515
100	87,35	1	0,687

$$Y = 0,0066x - 0,007$$

Hydrogen:

Prosent	Tid [s]	Volum [l]	Volum strøm [l/min]
0	0	0	0,000
20	101,51	0,5	0,296
50	35	0,5	0,857
80	37,15	1	1,615
100	28,13	1	2,133

$$Y = 0,0215x - 0,0951$$