

Termoakustisk Kjøleskap

Tormod Moen Vaule

Master i elektronikk
Oppgaven levert: Juni 2009
Hovedveileder: Ulf R Kristiansen, IET

Oppgavetekst

Oppgaven skal vesentlig være eksperimentell og skal konsentreres om følgende tema:

- Instrumentering og måling av energistrøm i termoakustisk demonstrasjonsapparat;
- Undersøkelse av optimalt lydfelt for kjøling;
- Konstruksjon og undersøkelse av effektiv varmeveksler

Oppgaven gitt: 16. januar 2009

Hovedveileder: Ulf R Kristiansen, IET

Forord

Arbeidet med denne oppgaven har vært både givende og engasjerende. Da jeg valgte masteroppgave var det to ting som var viktig: At jeg fikk holde på med noe jeg synes var gøy og at jeg fikk gjøre en del praktiske ting. Termoakustikk har vist seg å være veldig artig og jeg har fått deltatt masse under arbeidet med byggingen av kjøleren på det mekaniske verkstedet. Jeg har lært mye om både akustikk og mekanikk.

Jeg vil rette en spesiell takk til Tore Berg og de andre på Teleteknisk Verksted for sitt bidrag under byggingen av kjøleren, Ulf R Kristiansen for veiledning gjennom hele oppgaven, min samboer Sofie for maling av høytalerkassene og moralsk støtte samt mine foreldre og venner som har korrekturlest oppgaven.

Sammendrag

Termoakustikk går i korte trekk ut på å utnytte den lille temperaturdifferansen som genereres av trykkdifferansene som dannes av all lyd. En økning av trykket i en gass vil også øke temperaturen. Termoakustiske kjølere bygges for å oppnå høyest mulig lydtrykk slik at denne varmemeforandringen blir størst mulig. Varmeforandringen utnyttes ved hjelp av en buffer som kalles stakk. Stakkens oppgave er å lagre varme mens den flyttes fra et sted til et annet. Gassen som resonerer gjennom stakken flytter litt varme oppover ved hver svingning på samme måte som en menneskelig bøttekjede flytter vann. Ved å plassere en varmeveksler i varm side som kan ta ut overskuddsvarmen, blir det mulig å kjøle ned noe i kald side av stakken.

For å oppnå en målbar kjøleeffekt, ble kjøleren bygget større og mer komplisert enn kjøleren i forrige prosjekt. Før selve byggingen, ble kjøleren simulert i Comsol Multiphysics for å avgjøre viktige designkriterier. Den optimale rørlengden ved gitt frekvens, ble funnet til 98,3 cm. Selve byggingen ble gjort på mekanisk verksted ved NTNU. Det ble brukt et kraftig PA høytalerelement for å få maksimal effekt. Et akrylrør ble brukt som resonansrør og de fleste andre delene ble produsert i aluminium. En blokk av det keramiske materialet Celcor ble valgt til stakk. Dette materialet hadde alle de viktige egenskapene en god termoakustisk stakk burde ha. Systemet som gjorde det ble mulig å måle effekten, bestod av en varmetråd i den kalde siden av stakken og en varmeveksler for gjennomføring av vann i den varme siden.

Systemet ble først testet for å avgjøre hvor i røret stakken burde stå. Den optimale plassering var ca 2 cm fra toppen av resonatoren. Dette var ikke et forventet resultat og plasseringen ville dessuten gjort montering av varmeveksleren umulig. Det ble så målt trykkfordeling i røret, dempning og refleksjonsfaktor til stakken for å finne årsaken til den uventede optimale plasseringen. En direkte årsak til at kjøleren hadde best ytelse med stakken 2 cm fra toppen, i trykkmaksima av kvartbølgen, ble imidlertid ikke funnet. Stakken ble så fastmontert ca 5 cm fra toppen, varmetråden og varmeveksleren montert henholdsvis under og over denne. For å kunne finne et bra mål på kjøleeffekten ble varmeoverføringskoeffisienten til systemet målt. Denne ble funnet ved å sette forskjellige effektlaste i varmetråden til temperaturen i systemet stabiliserte seg. Ved stabil temperatur vil all varme som blir tilført systemet gå ut gjennom rørveggen. Varmeoverføringskoeffisienten ble målt til 0,23 watt/grad.

Ved å bruke den målte varmeoverføringskoeffisienten ble kjøleeffekten og virkningsgraden målt med en last fra 0 til ca 40 watt. Med 5 cm lang stakk oppnådde kjøleren en kjøleeffekt på ca 5 watt ved 14 grader og ca 15 watt ved 20 grader. Dette beviste at kjøleren klarte å pumpe en betydelig mengde varme, men at den ikke klarte å gjøre dette ved lave temperaturer. Dette ble antatt å skyldes at kjøleren ikke oppnådde høy nok temperaturdifferanse i utgangspunktet.

FORORD	I
SAMMENDRAG	II
FIGURER OG TABELLER	V
FIGURER.....	V
TABELLER.....	V
1 INNLEDNING	1
2 TIDLIGERE ARBEID	2
2.1 PROSESSEN.....	2
2.2 RESULTATENE	2
3 TEORIDEL	4
3.1 TERMOAKUSTIKKENS HISTORIE.....	4
3.2 TERMISK INNTRENGNINGSDYBDE.....	4
3.3 TOMIKROFONMETODEN	5
3.4 SLAGLENGDE OG GASSFORSKYVNING.....	6
3.5 VARMEOVERFØRINGSKOEFFISIENT	6
3.6 KJØLEEFFEKT	7
3.7 VIKTIGE BYGGEKOMPONENTER	7
3.7.1 <i>Resonansrøret</i>	7
3.7.2 <i>Driverementet</i>	8
3.7.3 <i>Høytalerkassen</i>	8
3.7.4 <i>Stakken</i>	9
3.7.5 <i>Varmeveksleren</i>	11
3.8 VIRKEMÅTE	11
3.9 BRUKSOMRÅDER	12
4 METODE OG RESULTATER	14
4.1 FREKVENSKALKULASJON	14
4.2 SIMULERINGER I COMSOL MULTIPHYSICS.....	14
4.3 BYGGING AV AKUSTISK KJØLER	15
4.3.1 <i>Materialvalg</i>	15
4.3.1.1 Råmaterialer.....	15
4.3.1.2 Stakk	15
4.3.1.3 Akustisk driver	16
4.3.1.4 Forsterker	17
4.3.2 <i>Framgangsmåte</i>	17
4.4 TESTING AV AKUSTISK KJØLER	22
4.4.1 <i>Oppkobling og utstyr</i>	22
4.4.2 <i>Akustisk driver</i>	23
4.4.3 <i>Frekvensspekter</i>	24
4.4.4 <i>Stakkposisjon og lengde</i>	24
4.4.5 <i>Måling av absorpsjonsfaktor med tomikrofonmetoden</i>	25
4.4.6 <i>Trykkfordeling</i>	27
4.4.7 <i>Varmeoverføringskoeffisient</i>	28
4.4.8 <i>Kjøleeffekt og virkningsgrad</i>	29
4.5 SYSTEMTEST	31
4.5.1 <i>Test 1</i>	31
4.5.2 <i>Test 2</i>	33
5 DISKUSJON	34
5.1 FREKVENNS.....	34
5.2 AKUSTISK DRIVER	34
5.3 STAKKPOSISJON	34
5.3.1 <i>Tomikrofonmetoden</i>	35

5.3.2	Trykkfordeling	35
5.4	VARMEOVERFØRINGSKOEFFISIENT	36
5.5	KJØLEEFFEKT OG VIRKNINGSGRAD	37
5.6	SYSTEMET	38
6	KONKLUSJON	40
7	VIDERE ARBEID.....	40
8	BIBLIOGRAFI.....	41
9	VEDLEGG.....	42
9.1	DATABLAD, DYNABEL PA 1250.....	42
9.2	DATABLAD, SEAS SW300/1 12"	43

Figurer og tabeller

Figurer

FIGUR 3.3.1. OPPSETT AV TOMIKROFONMÅLING[6].	5
FIGUR 3.8.1. CELCOR MED KANALER PÅ 2 MM × 2 MM.	10
FIGUR 3.9.1. STIRLING SYKLUS [10].	12
FIGUR 4.1.1. MODELL AV KJØLER I COMSOL	14
FIGUR 4.1.2. RESULTAT AV SIMULERING MED FORSKJELLIGE RØRELENGDER. 111,3 CM (T.V.), 98,3 CM (MIDT) OG 91,3 CM (T.H.).	15
FIGUR 4.2.1. STAKK, NETTOPP SKÅRET UT FRA KATALYSATOR.	16
FIGUR 4.2.2. ALUMINIUMSPATE PÅ ELEMENT OG KASSE.	18
FIGUR 4.2.3. RØRFLENS FESTET TIL RØR.	18
FIGUR 4.2.4. VARMETRÅD.	20
FIGUR 4.2.5. FESTE FOR STAKKJUSTERING.	20
FIGUR 4.2.6. VARMEVEKSLER.	21
FIGUR 4.2.7. PRODUKSJON AV VARMEVEKSLER.	21
FIGUR 4.2.8. FERDIGBYGGET KJØLER MED MONTERT VARMETRÅD OG VARMEVEKSLER SAMT TILKOBLET TERMOMETER OG VANN.	21
FIGUR 4.2.9. TOPPLOKK MED ALT UTSTYR.	22
FIGUR 4.3.1. FREKVENSSEKTER I RESONANSRØRET.	24
FIGUR 4.3.2. TEMPERATURDIFFERANSE PÅ POSISJON VED FORSKJELLIG STAKKLENGDER ETTER 1 OG 2 MINUTTER.	25
FIGUR 4.3.3. MÅLEAPPARAT FOR TOMIKROFONMETODEN.	26
FIGUR 4.3.4. AKUSTISK ABSORPSJONSKOEFFISIENT I FORHOLD TIL FREKVENS.	26
FIGUR 4.3.5. TRYKKFORDELING GJENNOM HELE RØRET.	27
FIGUR 4.3.6. TRYKKFORDELING RUNDT STAKK.	28
FIGUR 4.3.7. VARMESTRØM GJENNOM RØRVEGGEN SOM FUNKSJON AV TEMPERATUR.	29
FIGUR 4.3.8. TEMPERATUR SOM FUNKSJON AV EFFEKT I VARMETRÅD.	30
FIGUR 4.3.9. KJØLEEFFEKT SOM FUNKSJON AV MÅLTEMPERATUR.	30
FIGUR 4.3.10. VIRKNINGSGRAD MED 5 CM STAKK SOM FUNKSJON AV MÅLTEMPERATUR.	31
FIGUR 4.4.1. TEMPERATURUTVIKLING I VARMETRÅD OG VARMEVEKSLER TEST 1.	32
FIGUR 4.4.2. TEMPERATURUTVIKLING I VARMETRÅD OG VARMEVEKSLER TEST 2.	33

Tabeller

TABELL 3.8.1. VIRKNINGSGRAD OG FØLSOMHET FOR HØYTTALERE.	8
TABELL 4.3.1. UTSTYRSLISTE.	23
TABELL 4.3.2. UTREGNEDE KOEFFISIENTER	29
TABELL 4.4.1. TESTPARAMETRE FOR TEST 1.	32
TABELL 4.4.2. TESTPARAMETRE FOR TEST 2.	33

1 Innledning

I den moderne verden blir behovet for kjøling stadig større. All mat skal nå fryses eller kjøles og i tillegg har elektronikk- og datamaskinbransjen økende krav til kjøling på sine produkter. En prosessor fra nittitallet klarte seg med den kjølingen som var gitt av overflaten på selve brikken, mens dagens prosessorer har høyere varmeutvikling per areal enn noen kokeplate på markedet. Når verden i tillegg går mot en utvikling der miljøet blir viktigere blir det stilt stadig større krav til kjøleløsningene som lages. Termoakustisk kjøling er enda ikke på høyde med konvensjonelle løsninger når det kommer til virkningsgrad, men dette kan forandres. Flere av de som jobber med termoakustikk i dag har stor tro på at dette kan være en mulig løsning til et av verdens mange problemer i fremtiden.

Denne masteroppgaven har vært en fortsettelse på et prosjektarbeid om termoakustiske kjølere høsten 2008. Oppgaven har gått ut på å forbedre og videreutvikle designet samt å bygge en ny kjøler der det var mulig å måle kjøleeffekt. Oppgavens mål innbefattet ikke å lage en kjøler som kunne konkurrere med dagens kompressorkjølere, men å vise hvordan man kan lage og teste et akustisk kjøleskap på en praktisk måte.

Selv om byggingen av den forrige kjøleren var vellykket, var det fortsatt en del aspekter ved den som kunne utbedres. Byggingen og testingen av kjøleren ga, i tillegg til mersmak, mange gode ideer om hva som kunne forbedres for å oppnå bedre resultater. Det ble funnet ut at for å gi et reelt bilde av hvor bra en kjøler fungerte var det nødvendig å måle kjøleeffekten. For å klare dette måtte man i tillegg til enhetene som ble laget i prosjektet legge til en varmekilde og en varmeveksler. Spesielt varmeveksleren var en viktig komponent i kjøleren i masteroppgaven siden en effektiv varmeveksler er nødvendig for å kunne måle noen kjøleeffekt.

2 Tidligere arbeid

Denne masteroppgaven er basert på et tidligere prosjekt der hensikten var å vise konseptet bak termoakustisk kjøling. Det ble bygget en enkel kjøler som det ble utført en del tester på. Her følger en kort gjennomgang av hva som ble gjort og erfart under arbeidet.

2.1 Prosessen

Under byggingen av den første kjøleren ble det tatt utgangspunkt i en artikkel som omhandlet en enkel demonstrasjonsmodell av en akustisk kjøler [1]. Denne kjøleren ble videreutviklet for bruk i prosjektet.

Byggingen ble i hovedsak gjort på et mekanisk verksted. Et element med kasse som ble funnet passende til applikasjonen ble utgangspunkt. På elementet ble det festet en aluminiumsplate og påmontert et akrylrør med en diameter på 4 cm. I enden av røret ble det satt en aluminiumsplugg med kjøleribber. Kjøleribbene var der for å lede ut varmen som ble transportert opp mot toppen av røret. Gjennom pluggen ble det ført ledninger for termometer samt en mekanisme for å feste og justere stakken.

Testene ble foretatt med en frekvens på 285 Hz og et maksimalt lydtrykk på ca 163dB. Mye av testingen omhandlet valg og plassering av stakk. En stakk med parallelle plater av stål og en stakk av sammenrullet filmrull ble testet. For å finne optimal passering av stakken ble den flyttet stegvis samtidig som temperaturdifferansen ble avlest. Den optimale plasseringen ble brukt i de senere testene. Maksimal temperaturdifferanse ble registrert for å få en pekepinn på hvilken effekt kjøleren hadde. For å finne ut om omgivelsestemperaturen hadde noen effekt på ytelsen, ble ytelse i forhold til tid testet med forskjellige omgivelsestemperaturer. Trykkfordelingen i røret ble også målt. Dette for å se hvordan bølgemønsteret inne i røret var under operasjon.

Under arbeidet med kjøleren ble det funnet at systemet for temperaturmåling og stakkjustering var for lite fleksibelt. I tillegg var noen av koblingene mellom delene for svake slik at det oppstod uønskede vibrasjoner og lydlekkasjer. Kjøleribbene i toppluggen var overflødige siden varmen fra toppen av stakken gikk ut gjennom rørveggen før den nådde toppen av røret. Dette ga også et bilde av hvor stor varmetransporten gjennom den 5 mm tykke akrylrørveggen var, og at den burde tas hensyn til ved måling av kjøleeffekt.

2.2 Resultatene

Det ble funnet at stakken av 35 mm filmrull ga best resultat. Dette på grunn av stålets varmeledningsevne som motvirket den termoakustiske varmetransporten. Den optimale stakkposisjonen var med stakksenter ca 7 cm fra toppen som tilsvarte ca 1/20 av en bølgelengde. Med stakken i denne posisjonen var kjøleren i stand til å oppnå en temperaturforskjell på 32 grader. Under testene av ytelse i forhold til tid oppnådde kjøleren en temperaturdifferanse på 10 grader i løpet av 10 sekunder. 20 grader ble nådd etter ca 40 sekunder. Ved lang kjøring nådde kjøleren ganske raskt en stabil temperaturdifferanse. Etter denne var nådd flyttet begge temperaturene seg gradvis oppover slik at snittemperaturen økte

mens differansen var stabil. Den siste målingen som ble gjort omhandlet trykkfordeling i røret. Her ble det vist at trykket var høyest i toppen samt at det oppstod en kvartbølgeresonans. Begge disse resultatene var antatt i beregningene av systemet. Trykkfordelingen dannet imidlertid ikke en hel kvartbølge. Årsaken til dette ble antatt å være at det ikke hadde blitt tatt høyde for volumet mellom rørapningen og elementet. Deler av kvartbølgen forsvant trolig som følge av dette. Volumet forandret i tillegg resonansfrekvensen med nesten 100 Hz i forhold til hva som først var antatt.

Prosjektet ble konkludert med at det var praktisk gjennomførbart å lage en fungerende akustisk kjøler. Gjennom arbeidet og testingen med den akustiske kjøleren ble det avdekket hvilke deler av konstruksjonen og designet som var viktig for å oppnå god ytelse. Det ble også erfart og analysert en del fallgruver en kan gå i under bygging av en termoakustisk kjøler. Disse erfaringene ligger til grunn for et utvidet og grundigere arbeid i denne masteroppgaven.

3 Teoridel.

3.1 Termoakustikkens historie

Selve begrepet termoakustikk ble introdusert av Nicholas Rott på 60-tallet [2]. Han arbeidet mest med lineær teori som ikke fungerer ved høyt lydtrykk. Senere arbeid har tatt hensyn til ulineær oppførsel og det har i hovedsak gått ut på to forskjellige tilnæringsmetoder. Enten ved bruk av fremadskridende bølger eller ved bruk av stående bølger. Termoakustiske kjølere har senere blitt utviklet basert på Rott's forskning og de som kom etter han¹. Laboratoriene ved Los Alamos og Penn State i USA har en avdeling som jobber med termoakustikk og er langt fremme på området.

Tidligere arbeid med termoakustiske kjølere her på NTNU ble inspirert av en kjøler laget på 80-tallet [3]. I stedet for å bruke en akustisk driver til å skape lyd for å oppnå en varmetransport, hadde denne kjøleren ingen bevegelige deler. Den var satt sammen av to termoakustiske maskiner som var plassert i samme rør. Den akustiske motoren lagde lyd ved hjelp av varme i en stakk. Lyden ble ført ned i en resonator, og de resonerende bølgene skapte en varmetransport i den andre stakken som fungerte som kjøleren. Ved å tilføre en varmeeffekt på ca 400W klarte denne kjøleren en varmetransport på 10 W ved -6 °C [3].

Senere arbeid har i stor grad vært fokusert på å få opp effektiviteten. Wentzel og Herman[4] introduserte en optimaliseringsalgoritme som gikk ut ifra at hovedkomponentene i en akustisk kjøler kunne optimaliseres separat. I dag ligger hovedfokuset på å optimalisere stakken da dette er den komponenten i systemet der den termoakustiske effekten oppstår. Det har også vært forsket på geometri og materialet i resonatoren, drivelementet, varmevekslerne og hvilken gass som skal brukes i systemet [5].

3.2 Termisk inntrengningsdybde

Når man skal designe en stakk til en termoakustisk kjøler er det viktig å få rett avstand mellom lagene i stakken i forhold til frekvensen som skal benyttes. Den termiske inntrengningsdybden δ_k er et mål på distansen varme kan diffusere gjennom en gass i løpet av tiden $t=1/\pi f$, der f er frekvensen til den stående bølgen. En god tommelfingerregel er at mellomrommet mellom lagene i stakken bør være ca 2-4 termiske inntrengningsdybder fra hverandre[1]. Inntrengningsdybden avhenger av gassens termiske konduktivitet, κ , tetthet, ρ , og spesifikk varmekapasitet, c_p [1]. Utregningen vises i formel (3.1).

$$\delta_k = \sqrt{\frac{\kappa}{\pi f \rho c_p}} \quad (3.1)$$

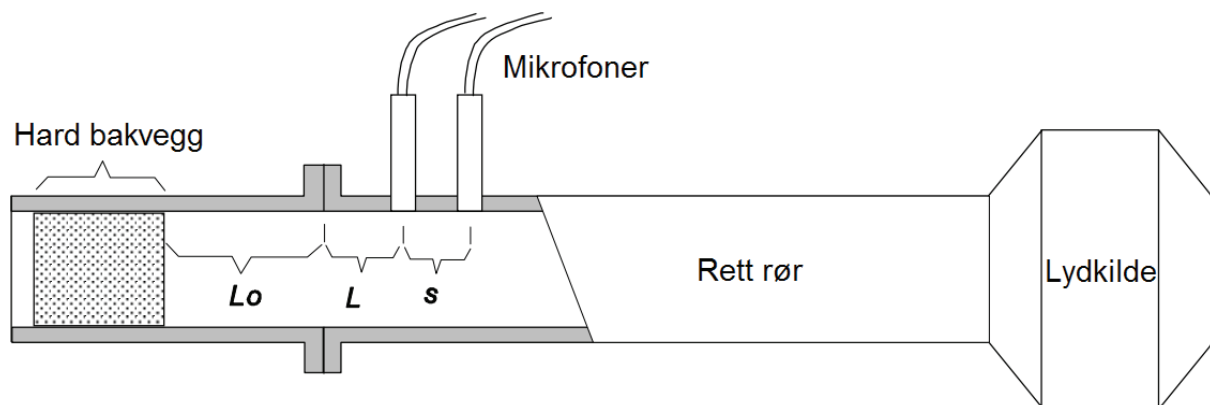
Hvis lagene i stakken er for langt fra hverandre, vil ikke apparatet fungere optimalt fordi varmen i gassen ikke rekker å diffusere inn i stakkmaterialet på den tiden gassen befinner seg

¹ Spesielt Moulay El HassanTijani og G.W Swift har bidratt mye for å drive forskningen på termoakustikk videre.

i det aktuelle området. Varmen fra gassen blir dermed ikke overført like effektivt til stakken og ytelsen svekkes. Hvis lagene derimot er for tett, vil andelen av røret som er blokkert av stakkens lag øke, slik at luftmotstanden i røret går opp. Økt luftmotstand gjør det vanskeligere for driveren å skape høyt lydtrykk i røret. Dette begrenser effekten, siden lydtrykket er viktig for å oppnå god ytelse.

3.3 Tomikrofonmetoden

Det finnes flere måter å bestemme de akustiske egenskapene til et gitt materiale. En av disse metodene er tomikrofonmetoden. Det man i hovedsak undersøker hvis man bruker denne metoden er materialets absorpsjonsfaktor. For å gjennomføre testen trengs utstyr som er ganske likt en termoakustisk kjøler i oppbygning. Man har et rør med en høyttaler i ene enden. Prøven skal plasseres i den andre enden (L_0). Bak prøven skal det være en hard reflekterende vegg. Mellom lydkilden og prøven plasseres to mikrofoner med gitt avstand s for å måle lydtrykket inne i røret.



Figur 3.3.1. Oppsett av Tomikrofonmåling[6].

Lydkilden genererer sinusveip med et bestemt frekvensområde. For å analysere målingene brukes en flerkanals spektrumsanalysator. Analysen kan også skje på en PC med et program som er laget og satt opp for denne type testing. Ved hjelp av transferfunksjonene H_{12} og H_{21} mellom de to mikrofonene finnes prøvens refleksjonsfaktor ved hjelp av formel (3.2). [6]

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{-jks} - H_{21}} e^{j2k(L+s)} \quad (3.2)$$

L er her avstanden fra overflaten av prøven til den første mikrofonen og s er avstanden mellom mikrofonene. Ved hjelp av refleksjonsfaktoren kan man finne absorpsjonskoeffisienten α og impedansen Z til materialet med formel (3.3) og (3.4).

$$\alpha = 1 - R \quad (3.3)$$

$$Z = \frac{1 + R}{1 - R} \rho_0 c \quad (3.4)$$

3.4 Slaglengde og gassforskyvning

Når et høytalerelement beveger seg har det en viss akselerasjon, fart og slaglengde. Disse parametrene er alle med på å bestemme lydtrykket og bevegelsen gassen foran høytaleren vil få. Lydtrykket er viktig for å oppnå høyest mulig ytelse, men påvirker ikke designet annet enn at konstruksjonen må være solid. Slaglengden og arealet til høytalerelementet er derimot viktig både for design av stakk og varmevekslere.

For å oppnå optimal overføring av varme fra gassen til varmeveksleren er det ikke gunstig at den varme gassen fra toppen av stakken svinger gjennom og ut av varmeveksleren. Dette unngås ved å lage varmeveksleren så lang at all gassen som kommer fra stakken ikke beveger seg lengre enn stakkens lengde. Med lengden menes varmevekslerens størrelse i x retning der x er 0 ved høytaleren og øker mot enden av resonatoren. For å finne ut hvor lang en varmeveksler bør være, må man finne maksimal gassforskyvning i røret. For å regne ut denne kan man bruke X_{max} (Voice Coil Overhang) og S_d (Surface Area of Cone) fra databladet til høytalerelementet samt de geometriske målene på resonatoren. X_{max} er den maksimale forskyvningen membranen kan ha i en retning og S_d er arealet til membranen. Den maksimale fortregningen av luft L_f (cm³) blir som i formel (3.5).

$$L_f = X_{max} * 2 * S_d \quad (3.5)$$

Hvis man da vil finne ut hvor mye luften inne i røret flytter seg (L_x) må man ta hensyn til innsnevringen når gassen går fra rommet mellom membranen og røret og inn i røret. Dette finnes ved å dele fortregningen med arealet av røret. Her er r den indre radien til resonansrøret.

$$L_x = \frac{L_f}{r^2 * \pi} \quad (3.6)$$

Resultatet her blir et mål på hvor langt luften flytter seg i nedre del av resonatoren. I teorien vil ikke luften flytte seg inntil en hard ende. Luftbevegelsen i varmeveksleren bestemmes ut ifra hvor langt oppe i røret den er plassert. Desto nærmere den harde enden, desto mindre utsving. Lengden på varmeveksleren bør derfor bestemmes i henhold til hvor den skal stå plassert.

3.5 Varmeoverføringskoeffisient

Varmeoverføringskoeffisienten gir en beskrivelse av hvor mye varme som går fra et område til et annet, der man har en temperaturforskjell mellom de to områdene. Enheten er watt per flate per temperaturforskjell (W/°Cm²) og benevnelsen er K . Hvis man har en rørvegg som skiller innsiden og utsiden av en termoakustisk kjøler der overflaten av veggen er A , den høye temperaturen inni er T_1 , den lave temperaturen utenfor er T_2 og varmestrømmen innenfra og ut er P vil varmeoverføringskoeffisienten følge formel (3.7)[7].

$$K = \frac{P/A}{T_1 - T_2} \quad (3.7)$$

I de fleste tilfeller vil ikke overflaten av veggen i en kjøler variere. Man kan derfor kutte ut A slik at benevnelsen blir watt per temperaturforskjell.

$$K = \frac{P}{T_1 - T_2} \quad (3.8)$$

Dette forholdet er viktig hvis man vil ha et nøyaktig mål på hvor mange watt en gitt kjøler kan yte. Ved å finne ut K før man gjør målingene vil man, gitt av temperaturen inni og utenfor kjøleren, til en hver tid vite hvor mye av varmen som går ut eller inn gjennom veggen. Det ville blitt en betydelig feilkilde dersom denne effekten hadde blitt medregnet som termoakustisk kjøleeffekt.

3.6 Kjøleeffekt

Den mest beskrivende parameteren en kjøleløsning har er kjøleeffekten. Den forteller hvor mye varme kjøleren er i stand til å flytte bort per tidsenhet. Kjøleeffekten til et hvert kjølesystem er avhengig av hvilken temperatur man vil ned på. Har man et objekt som avgir 100 watt varme er det lettere å kjøle det ned til 20 grader enn til 0 grader.

Temperaturdifferansen kjøleren klarer å produsere samt effektiviteten til varmeveksleren avgjør hvor stor kjøleeffekten vil være ved ulike temperaturer. Hvis måltemperaturen er 20 grader og kjøleren er i stand til å produsere en temperaturdifferanse på 30 grader, vil mediet som flyttes inn i varmeveksleren ende på 50 grader. Hvis omgivelsestemperaturen og dermed temperaturen på kjølemediet i varmeveksleren er på 20 grader, får man en differanse mellom indre og ytre medium i varmeveksleren på 30 grader. I det andre tilfellet med en ønsket temperatur på 0 grader vil mediet i varmeveksleren ende på 30 grader og forskjellen mellom indre og ytre medium blir 10 grader. Overgangen av varme mellom to medier beskrives på samme måte som i forrige avsnitt med en overføringskoeffisient. Effekten til kjøleren vil altså bli høyere målt i watt hvis måltemperaturen er høyere.

$$P_S = P_{VT} - ((T_i - T_u) * K) \quad (3.9)$$

I Formel (3.9) finner man kjøleeffekten til et system. Her er K varmeoverføringskoeffisienten til systemet, T_i temperaturene inni røret, T_u temperaturen utenfor og P_{VT} effekten i varmetråden.

3.7 Viktige byggekomponenter

3.7.1 Resonansrøret

Det er i resonansrøret de stående bølgene skapes. I den ene enden av røret ligger driverelementet som produserer lydbølger. Disse bølgene går rett inn i resonansrøret. Hvis

frekvensen stemmer med rørets lengde vil det oppstå resonans og stående bølger. Inne i røret ligger stakken og på hver side av stakken plasseres eventuelle varmetråder, laster eller varmevekslere. Frekvensen som skal benyttes bestemmer lengden på røret. Det er viktig at røret er solid slik at lyden holder seg inne i røret. Dette gir høyest lydtrykk og dermed bedre ytelse.

3.7.2 Driverelementet

En akustisk driver skal sette i gang svingningene og de stående bølgene i resonansrøret. Når man velger akustisk driver er de viktigste faktorene maksimal effekt og følsomhet. Det er disse to parametrene som avgjør det maksimale lydtrykksnivået en høyttaler kan oppnå. Maks effekt er et mål på hvor mange watt elementets talespole kan tåle før den brenner av. Denne effekten kan imidlertid ikke brukes direkte når man designer en termoakustisk kjøler fordi målemetoden ikke tilsvarer bruken. Når maksimal effekt måles påtrykkes hvit støy. Ved bruk av en kontinuerlig sinus i kjøleren vil vanligvis ikke et element tåle samme effekt over tid. På grunn av dette bør man alltid holde seg en del under oppgitt maks effekt. Det er vanskelig å vite akkurat hvor mye et element tåler. For å unngå å brenne elementet bør man derfor kontrollere om det er mye forvrengning av lyden og i tillegg følge med på om talespolen slår i magneten.

En høytales følsomhet sier noe om hvor høy virkningsgrad den har. Virkningsgraden er et mål på hvor mange prosent av inngangseffekten som omsettes til akustisk energi. Resten av effekten går direkte over til varme og vibrasjoner. I Tabell 3.7.1 vises følsomhet i dB ved 1 watt på 1 meter og korresponderende virkningsgrad i %.

Virkningsgrad (%)	0,1	0,2	0,4	0,5	0,8	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0	25,0
Følsomhet (dB)	82,0	85,0	87,4	89,0	90,8	92,0	96,0	99,0	100,8	102,0	106,0

Tabell 3.7.1. Virkningsgrad og følsomhet for høyttalere.

Vanlige hi-fi høyttalere har en følsomhet mellom 85 og 95 dB. Hvis man kjøper hjemmehøyttalere som er laget for høye lydtrykk vil man kunne finne enkelte med følsomhet opp mot ca 100 dB. PA høyttalere som er beregnet for konsertlokaler har en følsomhet på mellom 95 og 105 dB. Dette er en virkningsgrad på opp mot 25 %. Spesiallagede akustiske transdusere kan oppnå en virkningsgrad på opp mot 90 %. Disse fungerer imidlertid bare på et svært begrenset frekvensområde og sjelden ved lave frekvenser.

3.7.3 Høytalerkassen

For å øke lydtrykket samt isolere omverdenen fra støy, blir det oftest bygget et lukket kabinett rundt baksiden av elementet. Kabinettet gir i tillegg mulighet til å bruke høyere trykk i systemet siden man da kan utlikne trykket bak membranen. I de fleste prosjekter som har blitt studert før byggingen begynte, har kassen blitt bygget relativt liten for å unngå resonanser. Denne måten å gjøre det på er imidlertid ikke optimal hvis man vil oppnå maksimalt lydtrykk. Det er nettopp resonans man vil ha for å få størst mulig virkningsgrad.

Ved å designe en høytalerkasse som har samme resonansfrekvens som resten av systemet vil man oppnå bedre effektivitet. Volumet bak elementet vil da resonere ved systemfrekvensen og bidra til å øke utsvinget og lydtrykket. Dermed trenger man ikke like mye effekt for å oppnå samme resultat. I utførelsen av dette må man innhente elementets parametre. Med disse kan man regne ut hvilket kassevolum som gir resonans ved en gitt frekvens.

$$\alpha = \left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1 \quad (3.10)$$

$$V_B = \frac{V_{AS}}{\alpha} \quad (3.11)$$

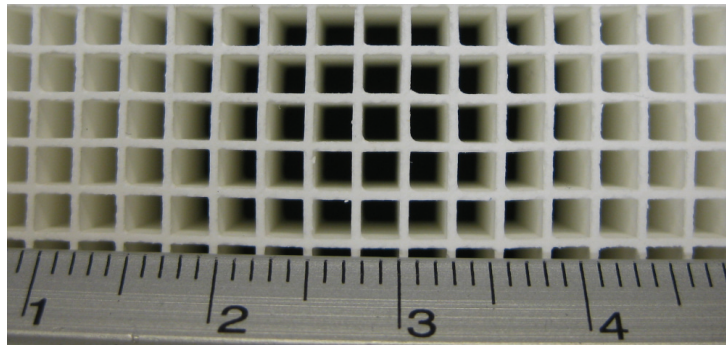
$$f_B = \frac{Q_{tc} * f_s}{Q_{ts}} \quad (3.12)$$

Her er Q_{ts} , V_{AS} og f_s verdier fra databladet mens V_B er boksvolum, f_B er boks resonansfrekvens, Q_{tc} velges større enn Q_{ts} og α er et forholdstall. Ved å sette inn ønsket resonansfrekvens for f_B kan man med disse ligningene finne et optimalt kassevolum for å oppnå høyest mulig lydtrykk ved f_B [8].

3.7.4 Stakken

Stakken spiller en viktig rolle i et termoakustisk system. Dens oppgave er å absorbere og avgj varmeenergi til og fra gassen i resonansrøret. Stakkens egenskaper avgjør hvilken frekvens som er optimal for et system.

Egenskaper som kjennetegner en god stakk er høy varmekapasitet, dårlig varmeledningsevne, høy perforeringsgrad og stor overflate mot gassen. Høy varmekapasitet er viktig for at materialet i stakken skal kunne lagre mest mulig varme som den kan avgj videre. Lav termisk konduktivitet eller ledningsevne er viktig for å unngå at varmen som avgis et sted på stakken ikke skal ledes rett tilbake mot kald side. Høy perforeringsgrad er viktig for å unngå at luftstrømmen bli hindret når den passerer stakken. Stor overflate er av betydning for å få mest mulig areal der varme kan overføres fra gassen til stakken og andre veien. Alle disse egenskapene vil bedre kjøleeffekten. Avstanden mellom platene i stakken er også viktig for dens ytelse. Dette på grunn av den termiske inntrengningsdybden som påvirker hvor effektiv varmeoverføringen fra gassen til stakken er.



Figur 3.7.1. Celcor med kanaler på 2 mm × 2 mm.

En stakk kan lages av flere forskjellige materialer. Siden det ble testet to billigere og enklere typer stakk i prosjektet, var det ønskelig å teste det omtalte keramiske materialet Celcor i masteroppgaven. Dette materialet har blitt brukt i flere mer markedsorienterte kjølere. Celcor består av firkantede parallelle kanaler. I Figur 3.7.1 vises Celcor på 2 mm × 2 mm avbildet med en linjal. Celcor har lav varmeledningsevne samtidig som varmekapasiteten er relativt høy. I tillegg til dette er overflatene og skjøtene rette, slik at en stakk av Celcor får lavere luftmotstand.

Celcor som i utgangspunktet ble designet avgassystemer, ble bygget med fokus på varmebestandighet, høyest mulig overflate og lavest mulig luftmotstand. På grunn av kravet om varmebestandighet lages Celcor i keramikk. Overflaten til det keramiske materialet er tilsynelatende glatt, men forstørret er den ru og porete. Det har vært gjort forsøk på den termoviskøse dempningen til materialet. Forskjellige fremgangsmåter ble testet for å gjøre stakken glattere [9]. En måte var å belegge stakken med en plastbasert lakk for å tette igjen porene. Resultatene av dette viste imidlertid at det ikke hadde noen effekt og at de termoviskøse tapene forble de samme.

I tillegg til materialet og spalteavstanden vil plasseringen og lengden til stakken i stor grad påvirke hvor bra kjøleren fungerer. En lang stakk vil gi en større trykkgradient gjennom stakken. Dermed kan den akustiske varmetransporten fungere over et lengre område. Dette vil isolert sett gi en større temperaturforskjell. På en annen side vil en lengre stakk gi akustisk motstand grunnet viskøse tap i kanalene. Dette vil føre til et lavere lydtrykk i røret og redusere varmetransporten. Den ideelle stakklengden er derfor et kompromiss mellom lang stakk med mye dempning og kort stakk med lav dempning.

Stakkens plassering avgjør i stor grad hvordan trykkfordelingen rundt og inni den vil se ut. Hvis stakken står nært et trykkmaksimum vil trykket være høyt mens volumhastigheten vil være lav. Hvis den står plassert nært et trykkminimum vil det bli omvent. For å oppnå en best mulig akustisk kjøleeffekt må det være tilstrekkelig volumhastighet ved høyest mulig trykk. Plasseringen blir derfor også her et kompromiss, denne gangen mellom volumhastighet og lydtrykk.

3.7.5 Varveksleren

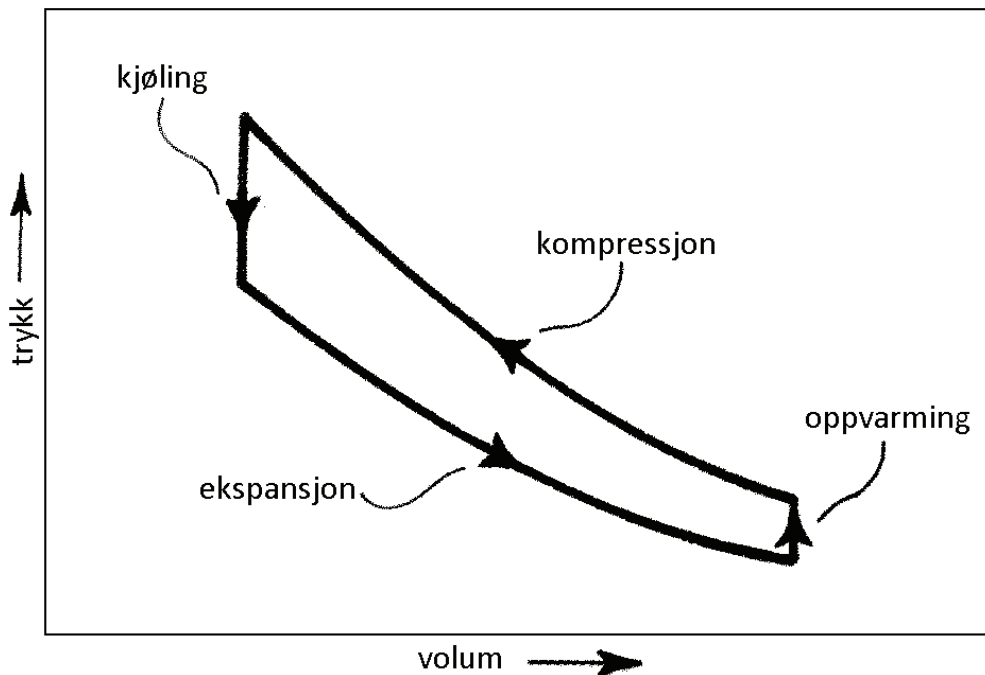
For at en termoakustisk kjøler skal kunne brukes til noe praktisk må man ta hånd om varmen som kontinuerlig flyttes fra kald til varm side av stakken. Hvis man plasserer en varmeveksler rett ved stakken i varm side, vil denne kunne motta og lede ut varmen slik at mer varme kan flyttes fra kald side. På denne måten vil man øke effekten samtidig som man muliggjør en kontinuerlig kjøling av en eventuell varmestrøm inn til kald side av stakken.

En effektiv varmeveksler har stor overflate og høy termisk konduktans. Stor overflate skaper en stor kontaktflate mellom gassen og varmeveksleren. Høy termisk konduktans er viktig slik at varmen fra gassen ledes raskest mulig inn i varmeveksleren. En varmeveksler må også ha et kjølemedium som varmen kan ledes over til. Vann fungerer bra siden det har høy varmekapasitet og derfor kan ta til seg mye varme.

En viktig parameter er, som tidligere nevnt, lengden på varmeveksleren. Den må ikke være så lang at den bidrar med unødvendig akustisk demping av systemet. Samtidig må den være lang nok til at den varme gassen ikke går gjennom og ut på andre siden under en svingning.

3.8 Virkemåte

For å skape en termoakustisk kjøleeffekt må man opprette et lydfelt. For at dette lydfeltet skal bli sterkest mulig brukes ofte en konstruksjon som skaper resonans ved en gitt frekvens. Dette skaper en kraftigere lyd. Lyd er periodiske trykkvariasjoner i et medium. En trykkvariasjon i et medium vil påvirke varmen. En økning av trykket fører dermed til at temperaturen stiger litt der trykket er høyt, mens den synker litt der det er lavt. Med andre ord vil man ha en temperaturvariasjon i alle medier så lenge det er lyd der. Variasjonen er ikke større enn 0,02 °C selv ved høyt lydtryknivå (120 dB med referansetrykk 20 μPa)[10]. Denne temperaturforskjellen er ikke så stor at den kan brukes direkte. Det er derfor nødvendig med et system som klarer å ta vare på den lille varmforskjellen som oppstår for hver periode av lyden for å kunne akkumulere denne.



Figur 3.8.1. Stirling syklus [10].

Stakken er den viktigste komponenten i omgjøringen av lyd til varme. Det er i stakken forflytningen av varme skjer. Prosessen er vist i Figur 3.8.1 som trykk i forhold til volum. Når gassen resonerer frem og tilbake langs stakken, blir den komprimert og utvidet igjen i takt med lydbølgene (kompressjon og ekspansjon i Figur 3.8.1). Komprimeringen fører til en økning av temperaturen i gassen. Gassen med økt temperatur som samtidig har flyttet seg litt nærmere stakkens varme side, vil så overføre varme til stakken som da vil være litt kaldere enn den komprimerte gassen (kjøling). Etter at gassen har avgitt en del varme til stakken, fører lydbølgene den tilbake igjen (ekspansjon). På vei tilbake mot kald side blir gassen kaldere fordi trykket har gått ned. Den kan ta imot mer varme fra den kalde siden (oppvarming). Dette er en syklus som foregår over hele lengden av stakken. Resultatet er at stakken blir kald på en side og varm på den andre. All varmen flyttes gradvis mot den varme siden. Når man i tillegg har en varmeveksler i varm side, vil den trekke ut varmen fra gassen slik at den varme siden holder en lavere temperatur. Siden kjøleren hele tiden jobber mot en konstant temperaturredifferanse mellom varm og kald side, vil dette føre til at kald side blir enda kaldere.

3.9 Bruksområder

Termoakustiske kjølere har i all hovedsak blitt benyttet der kravene til vedlikeholdsfrihet og pålitelighet har vært ekstreme. Et lovende bruksområde for akustiske maskiner i fremtiden er nedkjøling av flygasser (LNG). Utviklingen på dette området er godt i gang og man har allerede fungerende modeller. I 2003 hadde man et apparat for å lage LNG som hadde en kapasitet på 530 liter per dag. En modell på ca 2000 liter per dag var også nesten ferdigstilt. Los Alamos National Laboratory stod bak begge disse kjølerne [11]. Den første av dem mottok i 2003 prisen "The New Horizons Idea Award" fra *World Oil Magazine*.

Iskremprodusenten Ben & Jerrys gikk i 2002 sammen med Penn State University for å bygge en termoakustisk fryseboks for iskrem [12]. Prototypen stod ferdig i 2004 og kunne levere ca 120 watt kjøleeffekt ved imponerende $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Termoakustiske kjølere har også blitt brukt for å kjøle ned radarelektronikk på krigsskip for det amerikanske forsvaret [13]. I en slik applikasjon er påliteligheten til en termoakustisk kjøler avgjørende.

4 Metode og resultater

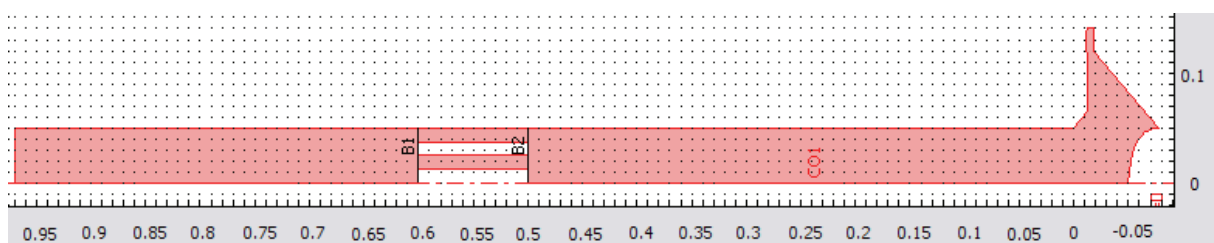
4.1 Frekvenskalkulasjon

Ved bruk av formelen for inntrengningsdybde ble den optimale frekvensen regnet ut. Gitt av stakkens parametre ble den termiske inntrengningen regnet ut til å være optimal ved 90 Hz.

4.2 Simuleringer i Comsol Multiphysics

På grunnlag av erfaringene fra prosjektet ble det bestemt å simulere resonatoren før bygging. Dette for å unngå at det ferdige systemets resonansfrekvens skulle avvike for mye fra den ønskede frekvensen. Et problem som oppstod i prosjektet var volumet mellom driverelementet og rørmunningen. Dette volumet var vanskelig å ta hensyn til når lengden på røret skulle regnes ut som funksjon av ønsket resonansfrekvens. Det førte til at arbeidsfrekvensen endte ca 35 % lavere enn beregnet. Dersom avviket fra ideell frekvens skulle bli for stort, ville ikke stakkens ytelse bli optimal og kjøleeffekten ville blitt redusert. Ved å simulere resonansrøret var det mulig å legge inn de nøyaktige målene slik at man oppnådde en forbedret tilnærming til den endelige frekvensen. Under simuleringene ble det i hovedsak eksperimentert med forskjellige lengder på resonansrøret.

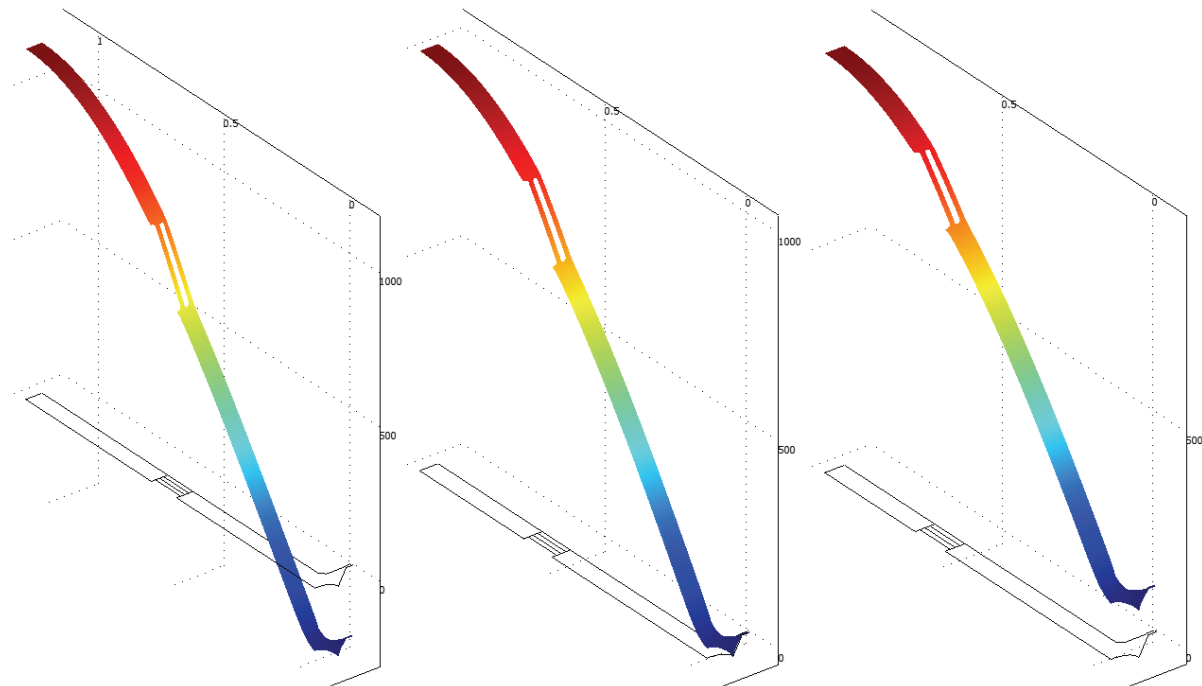
Programmet som ble valgt for simuleringene var Comsol Multiphysics Versjon 3.5. Akustikkmodulen og aksialsymmetrisk 3D-simulering ble brukt til å lage en modell av det indre volumet i resonatoren. Elementet og overgangen fra elementet til røret ble målt. Målene ble brukt til å lage modellen. Det ble plassert en kilde med normalakselerasjon langs grenseflatene som skulle utgjøre membranen. Denne kilden ble satt til å påtrykke en sinus på 90 Hz. Deretter ble det simulert med flere forskjellige lengder på røret for å se hvilken lengde som resulterte i en kvartbølge på 90 Hz. For å gjøre simuleringen mest mulig nøyaktig ble det tatt hensyn til stakkens perforeringsgrad ved å legge inn en hindring i røret som tilsvarte graden av blokkering som stakken ville ha. Lengden på blokkeringen ble satt til 10 cm som var den opprinnelige lengden til stakken. Det ble også lagt inn forskjellige lufttemperaturer over og under stakken for å få riktigere lydshastighet. I Figur 4.2.1 vises modellen slik den så ut i redigeringsverktøyet i Comsol. Det fargede området er det indre volumet i resonatoren. Ved å rotere figuren rundt x-aksen ser man membranen og begynnelsen av røret til høyre i bildet. Videre kan man se røret gå mot venstre med blokkeringen litt mot venstre fra midten.



Figur 4.2.1. Modell av kjøler i Comsol

Resultatene av målingen var i første omgang figurer som ga en grafisk fremstilling av lydtrykket inne i resonatoren. Ut ifra dette var det mulig å se hvilke moder som oppstod i resonatoren som et resultat av ulike lengder (Figur 4.2.2). Man kan se på figuren at bølgen i røret forskjellig ut ved forskjellige lengder. Til venstre i figuren har røret en lengde på 111,3

cm. Røret er da så langt at det er plass til mer enn en kvart bølge i det. Med denne lengden vil man ikke oppnå resonans ved 90 Hz. Til høyre i figuren er røret 91,3 cm. Man kan her se at det ikke formes en fullstendig kvartbølge siden røret er for kort. Illustrasjonen i midten av figuren er simulert med en lengde på 98,3 cm. Denne lengden ble senere brukt under byggingen. Her er det tydelig at kvartbølgen passer med lengden av røret siden trykket har maksima i toppen og går til null i bunnen.



Figur 4.2.2. Resultat av simulering med forskjellige rørelengder. 111,3 cm (t.v.), 98,3 cm (midt) og 91,3 cm (t.h.).

4.3 Bygging av akustisk kjøler

4.3.1 Materialvalg

4.3.1.1 Råmaterialer

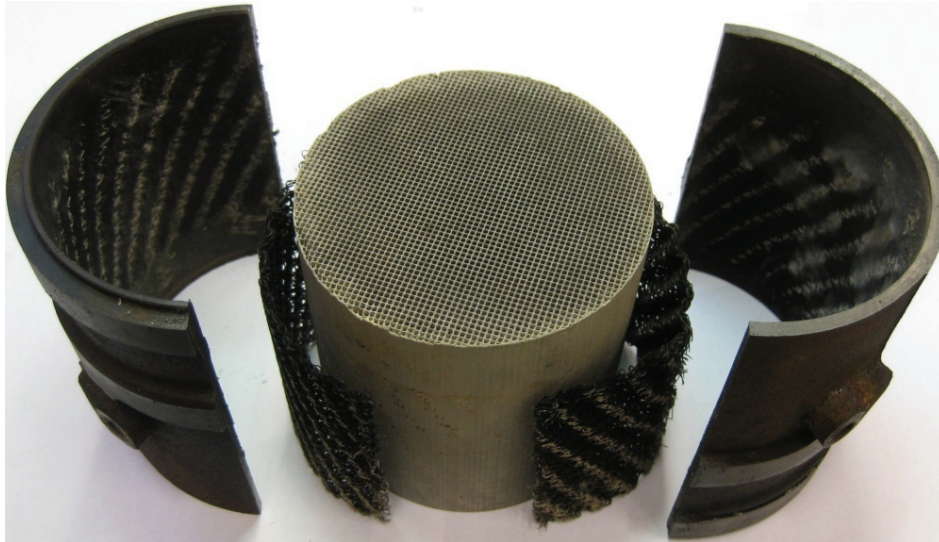
De fleste viktige delene av kjøleren utenom røret og høytalerkassen er laget i aluminium. Aluminium er brukt av flere grunner. Det er billig, det veier lite, det er relativt stift og det er lett å jobbe med. Det er kun brukt stål i støttestagene, stakkjusteringsstangen og sondemikrofonen. Dette på grunn av kravet om lite omfang, men høyest mulig stivhet.

Det ble brukt kobber i varmeveksleren for å få størst mulig varmeoverføring. I røret ble det brukt akrylplast. Dette materialet er lett, relativt stift og i tillegg gjennomsiktig. Gjennomsiktigheten var viktig for å kunne observere hvor stakken befant seg når optimal stakkposisjon ble målt. I høytalerkassen ble det brukt 28 mm tykk belagt sponplate. I avstiveren ble det brukt en kloss av heltre.

4.3.1.2 Stakk

I prosjektrapporten ble det skrevet en del om valg av stakk. Valget falt her på en filmrullstakk. Ønske om en større og mer profesjonell kjøler med både bredere og lengre stakk gjorde at valget falt på en stakk av Celcor. Diverse skraphandlere ble kontaktet. Til slutt falt valget på

en stakk som kom fra katalysatoren i en Nissan Primera (Figur 4.3.1). Denne hadde kanaler på $1,1 \text{ mm} \times 1,1 \text{ mm}$ og en veggtykkelse på ca $0,35 \text{ mm}$. Dette resulterer i en perforeringsgrad på ca 50% , noe som er ganske dårlig sammenliknet med perforeringsgraden til filmrullstakken i prosjektet som hadde en perforeringsgrad på ca 65% .



Figur 4.3.1. Stakk, nettopp skåret ut fra katalysator.

4.3.1.3 Akustisk driver

Den akustiske driveren ble valgt på grunnlag av de erfaringene som ble gjort under høstens prosjekt. Der ble det brukt en Seas 6,5 tommer på 100 Watt. Dette var et element som i større grad var laget for å spille pent enn for å spille høyt. Elementet brukes blant annet i flere dyrere høytaleroppsett. Elementet i prosjektet ble ikke valgt på grunn av sine spesifikasjoner, men fordi det ble funnet på akustikklageret ferdig med kasse. Ved å velge dette elementet ble det spart en del tid som ellers ville ha gått med til bygging av kasse. I denne masteroppgaven ble det bestemt at det skulle kjøpes inn nytt utstyr som var mer egnet for applikasjonen. Kriteriene for valget av nytt element ble størrelse, følsomhet og effekthåndtering. Valget falt på et element fra Eltek. Dynabel PA1250 (9.1 Datablad, Dynabel PA 1250) er Eltek's eget PA-element som blir laget for bruk i scenesammenhenger. Elementet har en størrelse på 12" og maks effekt på 500 Watt. Med en følsomhet på 99 dB ble dette elementet antatt å kunne levere meget høye lydtrykk.

PA-elementer blir laget for å spille høyest mulig med minst mulig effektbruk, og tanken var at dette ville gi bedre effektivitet på kjøleren. Det ble imidlertid oppdaget at dette elementet hadde en begrensning som gjorde at det ikke var mulig å hente ut maksimal effekt. Den maksimale slaglengden som var begrenset av opphenget, talespolen og magneten var $3,25 \text{ mm}$ i hver retning. Med resonans i røret viste det seg at denne maksimale slaglengden ble oppnådd lenge før maks effekt var nådd. Det ble derfor vurdert andre elementer med lengre slaglengde for å teste hvilken effekt dette ville ha på ytelsen. En SEAS Lotus SW300 12" bilstereobass ble valgt. Maksimal lineær slaglengde på dette elementet var oppgitt til $13,5 \text{ mm}$ hver vei, mens maks effekt var 180 Watt. Med en følsomhet på 92 dB/W. M skulle teoretisk sett maksimalt lydtrykk bli lavere enn med Dynabel-elementet, men grunnet

slaglengdebegrensningene ble det besluttet å teste et element av denne typen. SEAS elementet passet i samme kasse og var derfor lett å montere.

4.3.1.4 Forsterker

I forhold til prosjektet, der driverelementet var på 6,5", ville 12"-elementet i den nye kjøleren kreve adskillig mer effekt for å yte maksimalt. Elementet i prosjektet hadde en maks RMS effekthåndtering på 100 Watt, mens PA elementet i den nye kjøleren tålte 500 Watt RMS. Monoblokken (Quad 50E) på 50 Watt som ble brukt under testing av den gamle kjøleren ble derfor for liten. Den nye forsterkeren som ble valgt var en forsterker fra lageret til akustikkavdelingen på NTNU. Det var en Adyton Dynergy på 2x310w ved 8 ohm. Denne ble kjørt i en kanal. Dette ble besluttet å være tilstrekkelig siden en sinus med en effekt på 500 watt mest trolig ville ha brent av talespolen i elementet.

4.3.2 Framgangsmåte

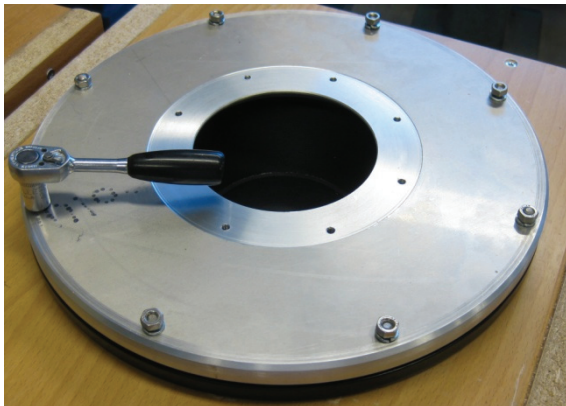
Designet av den nye kjøleren ble bestemt på grunnlag av både teorien og erfaringene fra kjøleren i prosjektet. Stakken av Celcor, som ble anskaffet, avgjorde lengden og bredden på resonansrøret. Elementet som ble kjøpt avgjorde kassen og overgangen mellom elementet og røret. Bortsett fra dette ble materialer og metoder bestemt for å gjøre kjøleren solid samt enklest mulig å lage. Kjøleren ble solid bygget for å unngå vibrasjoner. Når opphenget til et høyttalerelement vibrerer, blir mindre av energien som tilføres elementet omgjort til lyd. Dette senker effektiviteten til systemet. Det ble også fokusert på at de ulike systemene skulle være enkle å plukke fra hverandre for modifisering. Under den følgende beskrivelsen av byggeprosessen vil det bli lagt vekt på og fremhevet de elementer og metoder som ble gjort på en ny og bedre måte i forhold til kjøleren fra prosjektet.

Før selve byggingen kunne begynne, måtte eksakte mål av elementet, stakken og akrylrøret finnes. Disse målene ble brukt videre for å planlegge hvordan delene til kjøleren skulle utformes. Byggingen startet med den runde platen som skulle forbinde røret og den akustiske driveren. Det ble her valgt en ganske tykk aluminiumsplate som ble tilpasset i en dreiebenk. Det ble dreid inn en fordypning i den siden av platen som skulle vende mot elementet slik at membranoppheget ikke kunne slå opp i platen ved store utsving. Videre ble det laget 8 hull til skruer tilpasset hullene i rammen til elementet. Tanken her var at det skulle brukes gjennomgående bolter fra innsiden av høyttalerkassen gjennom kassen, elementet og aluminiumsplaten med en mutter på toppen.

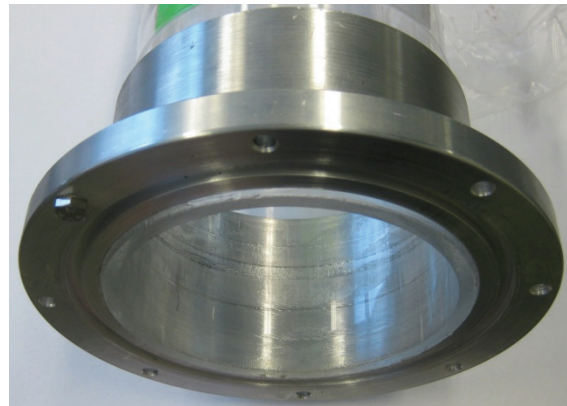
Kassen til elementet ble bygget av benkeplate. Volumet ble valgt for å oppnå en forsterkning i frekvensområdet som skulle brukes. Hvis man vil ha resonans ved en frekvens mellom 85 og 90 Hz er ideelt kassevolum fra 28 til 33 liter. Volumet ble valgt til 33 liter og kassen ble laget kubisk. Den ble limt og skrudd sammen for størst mulig stivhet. Inne i kassen ble det satt en avstiver fra bakveggen til baksiden av magneten. Den var plassert slik at magneten ble presset mot treklossen når kassen ble skrudd sammen. Avstiveren ble satt inn for å dempe vibrasjoner i kassens baffel ved at den avlastet noe av kreftene mot bakplaten. Innsiden av kassen ble også dekket med dempeskum for å dempe uønskede lyder.

Når høyttaleren var festet i ferdig kasse med aluminiumsplatene skrudd fast (Figur 4.3.2) ble skjøten mellom akrylrøret og aluminiumsplatene laget. Hensikten med denne var å binde sammen elementet med røret på en solid måte slik at det ble tett. Under arbeidet med prosjektet ble det brukt o-ringer på røret, og et stykke av et aluminiumsrør som dette ble tredd ned i. Dette var ikke stivt nok og skapte vibrasjoner og ulyd. Den nye løsningen ble valgt for å unngå noen form for vibrasjon eller bevegelse i skjøten mellom rør og aluminiumsplate. Skjøten ble laget ved at en bit av et aluminiumsrør ble sveiset fast til en ring med samme innerdiameter og større ytterdiameter. I denne ringen ble det laget hull for skruer. Det ble også laget hull i aluminiumsplatene samt en nedfelling for ringen slik at den kunne skrues direkte på platen med 8 skruer. I røret ble det dreid ut spor for å få størst mulig kontaktflate mot lim. Deretter ble flensen med røret limt fast til utsiden av akrylrøret med epoksyrim. Ringen vises i Figur 4.3.3. Der kan man se akrylrøret festet slik at det stakk ut litt nedenfor aluminiumsflensen. Dette ble gjort for å få overgangen mellom rør og aluminiumsplate glattest mulig.

Med en lengde på ca 1 meter ble det bestemt at det ikke var nok med bare skruefeste i ene enden av røret. Man måtte i tillegg ha noe for å stive opp konstruksjonen. Det ble også erfart under arbeidet med prosjektet at det lett oppstod vibrasjoner og ulyd mellom deler der det ikke ble brukt skruer. Toppløkket til røret ble derfor laget med en aluminiumsstang tvers over som bygde like langt ut som boltene gjennom aluminiumsplatene. Med doble muttere ble det festet gjenget stag med samme lengde som røret. Disse støttestagene ble satt gjennom hull i hver ende av stangen og det ble satt på muttere. Dette bidro til en stivere konstruksjon samtidig som det dro toppløkket ned mot enden av røret (Figur 4.3.8). For å tette ble det plassert en o-ring i skjøten.



Figur 4.3.2. Aluminiumsplate på element og kasse.



Figur 4.3.3. Rørflens festet til rør.

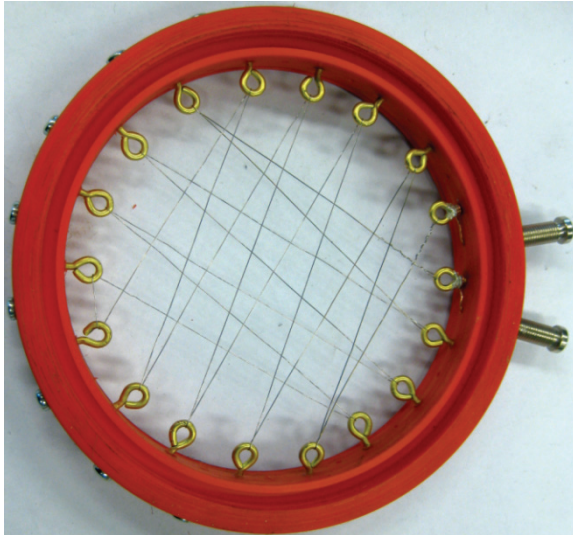
Stakken, som kom direkte fra en bil, var opprinnelig inne i en stålkappe (Figur 4.3.1). Denne ble skåret forsiktig bort og stakken ble rensert med løsemiddel og ultralydvasker for å fjerne mest mulig skitt. Den hadde noen små skader i ene enden og ble derfor kappet med båndsg til en lengde på ca 9,5 cm. Rørets indre diameter var på 100 mm og stakkens ytre diameter var på 92 mm. Den ble derfor limt inn i en bit akrylrør av samme type som resonansrøret. Dette røret hadde en ytre diameter på 100 mm og en indre som passet rundt stakken. Ytterkappen ble kuttet litt lengre enn stakken og dreid slik at den fikk en skrånende kant innover mot stakkflaten som en trakt. Den ble også utstyrt med et stålstag fra den ene enden til den andre

med tilbøyde kroker i begge ender for montering av utstyr for å justere stakken. Etter de første testene ble det bestemt at stakken skulle kuttes til halv lengde.

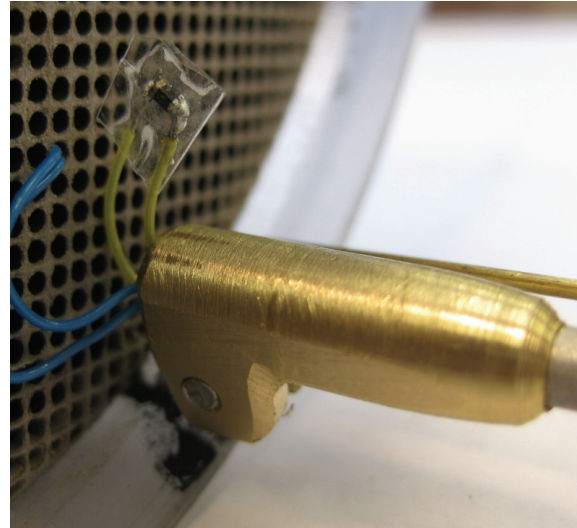
I forhold til løsningen som ble brukt i prosjektet var det en stor utfordring å lage en stakkjustering der stakken kunne justeres i røret, mens det samtidig var mulig å hente ut signalene fra temperatursensorene. I den gamle løsningen hadde stakken begrensninger på bevegelsen grunnet ledningene til temperatursensorene. I den nye kjøleren ble dette løst ved at et stålrør ble skrudd fast i kroken på stakken (Figur 4.3.5). Røret med ca lik lengde som resonatoren ble tredd opp gjennom et hull i topplokket. Inne i stålrøret ble det lagt fire ledere for å kunne lese av temperatursensorene. Gjennomføringen gjennom topplokket ble gjort ved å lage en egen ring av messing med en festeskruer. Denne ringen ble gjenget opp og skrudd ned i lokket (Figur 4.3.9). Et problem med denne måten å justere stakken på var at justeringsstaget var festet i den ene siden av stakken i stedet for i midten. Dette førte til at tyngdepunktet ble forskjøvet slik at stakken hang skjevt. Dette skapte friksjon mellom stakken og rørveggene. For å få stakken til å gli lettere ble det derfor brukt smøremiddel med teflon.

Temperaturene ble målt på flere måter. I første fase der kjøleren ble testet med stakkjustering ble det brukt et enkelt inne/ute-termometer. Temperatursensorene ble loddet ut og ledningene forlenget ned gjennom stakkjusteringsrøret. En sensor ble satt i kald side av stakken med ledningen gjennom en av kanalene i Celcor-stakken. Den andre ble satt i varm side rett ved festet for justeringsrøret (Figur 4.3.5). Etter at varmeveksler og varmetråd var montert ble temperaturen inne mellom lagene i varmeveksleren og temperaturen mellom viklingene i varmetråden målt med et mer nøyaktig termometer. For å måle temperaturene ble det laget hull i siden av røret og sensorene ble tredd inn. Litt lim ble brukt for å tette.

De tidligere nevnte stegene ble gjort for å ferdigstille kjøleren til første fase av testingen. Videre kom utvikling og bygging av systemet for å kunne måle ytelsen av kjøleren i watt. Den tilførte effekten ble generert ved hjelp av varmetråder. Her ble det laget en ring som var ca 2 cm høy og hadde samme diameter som røret. Ringen ble laget slik at den kunne settes inn mellom to ender av røret. På denne måten kunne man kutte røret der det passet og sette inn varmeringen. Den ble utstyrt med innvendige kroker og to gjennomgående ledere festet til bananpluggkontakter for tilkobling. Varmetråden ble surret i trekantmønster mellom krokene, og endene av tråden ble loddet fast til hver sin leder ut gjennom veggen (Figur 4.3.4). Det ble brukt uisolert varmetråd med en total motstand på ca 43 ohm.



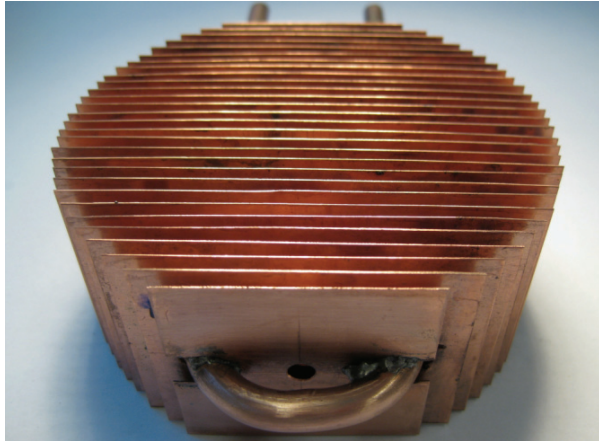
Figur 4.3.4. Varmetråd.



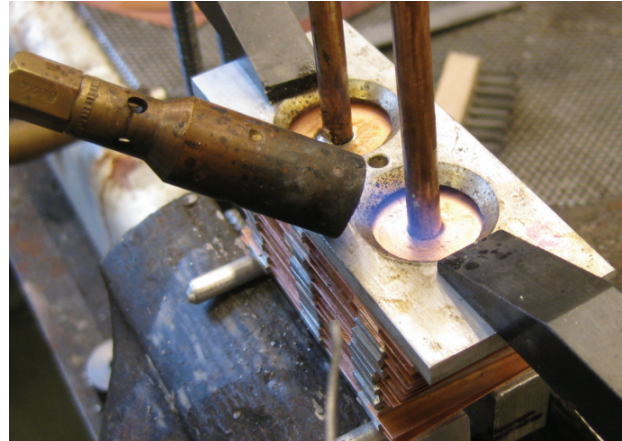
Figur 4.3.5. Feste for stakkjustering.

For å øke effekten, slik at den kunne bli praktisk mulig å måle, ble det bestemt at en varmeveksler var nødvendig. Dette var også en naturlig fortsettelse av det som ble gjort i prosjektet. Varmeveksleren var kanskje den mest teknisk utfordrende delen av byggingen. Den ble laget av kobberør og kobberplater. Først ble det kappet opp kobberplater med en bredde på 4 cm og en lengde som formet en sirkel hvis de ble satt med en bestemt avstand (Figur 4.3.6). Tykkelsen på platene var 0,5 mm og avstanden mellom dem ble satt til 5 mm. Siden denne delen skulle stå inne i røret var det svært viktig at plater og fester ble så rette og glatte som mulig. Ujevnheter ville skape uønsket luftmotstand som kunne svekke ytelsen. I alle platene ble det boret to hull slik at de kunne tres inn på kobberøret. Først ble røret bøyd til en U. Dette for å skape en vannstrøm gjennom kjøleren med en inngang og en utgang. Bøyen på 180 grader skulle ligge inntil veggen i kjøleren og de to endene skulle tas ut gjennom veggen for vanntilførsel. Det ferdig bøyde kobberøret ble satt mellom to klosser i en skrutvinge slik at rørene stod loddrett. Deretter ble neste plate tredd ned på rørene og loddet fast med varmlodding (Figur 4.3.7). For å opprettholde riktig avstand ble det plassert tre 5 mm tykke aluminiumsklosser mellom hver plate samt satt på klemmer på hver side etter hver lodding. Denne prosessen ble gjentatt med alle de 31 platebitene. Resultatet ble en sirkulær varmeveksler som vises i Figur 4.3.6.

Monteringen av varmeveksleren inne i røret var komplisert, siden formen var slik at det ikke var mulig å sette den direkte inn i røret. Det ble derfor laget en sirkulær hylse på samme måte som det ble gjort til varmetråden. Denne fikk ca samme lengde i x-retning som varmeveksleren. Dette gjorde det lettere å montere og feste varmeveksleren. Hylsen ble utstyrt med o-ringer i begge ender. Når plasseringen var bestemt ville det bare være å kutte røret, plassere den mellom de to endene, sette på topplokket og stramme støttestagene.



Figur 4.3.6. Varmeveksler.



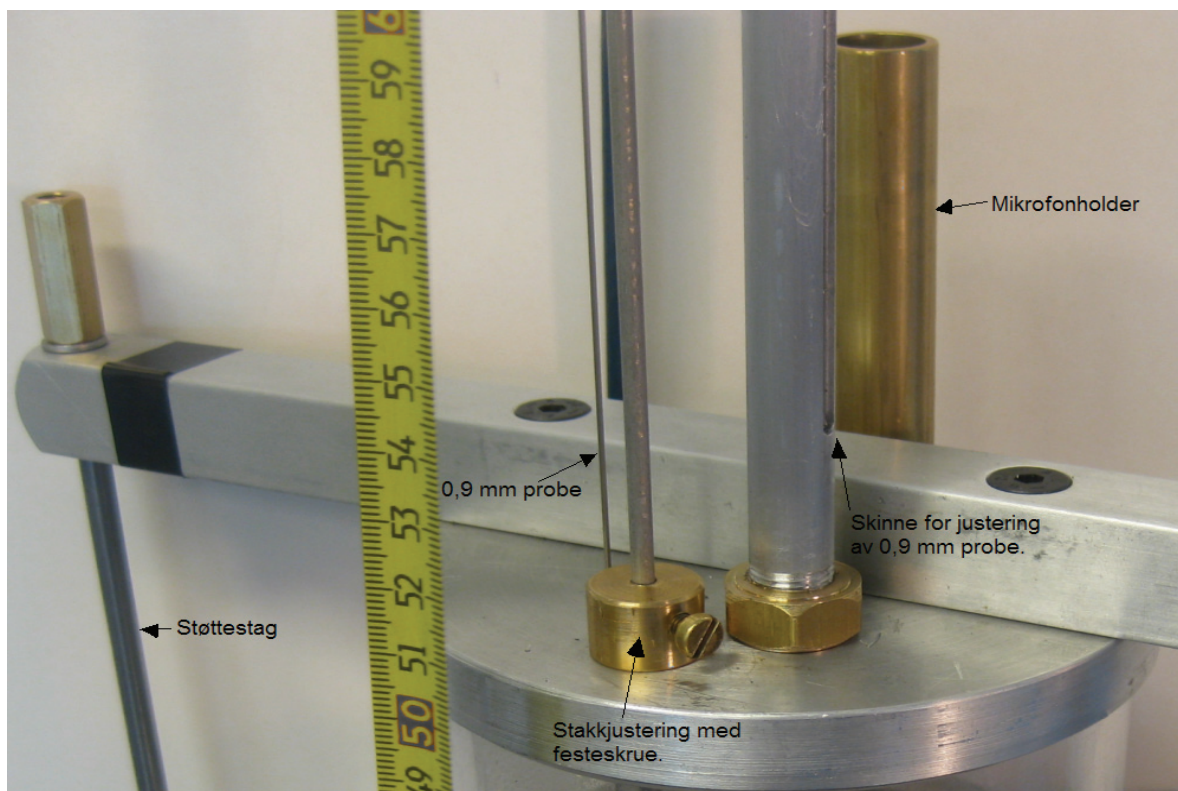
Figur 4.3.7. Produksjon av varmeveksler.

I tillegg til stakkjusteringen med gjennomføring av temperatursensorer, ble det laget to systemer for å måle lydtrykk. Det første systemet var det som ble tatt i bruk helt fra starten av målingene. For å måle lydtrykket i toppen av røret ble det laget en holder for en 0,5" kondensatormikrofon med sonde. Den ble laget av en bit messing som ble dreid slik at sonden til mikrofonen passet. Enden der sonderøret kom ut ble gjenget slik at den kunne skrues rett ned i topplokket av kjøleren. Holderen er festet uten mikrofon i Figur 4.3.9.



Figur 4.3.8. Ferdigbygget kjøler med montert varmetråd og varmeveksler samt tilkoblet termometer og vann.

Det siste målesystemet som ble laget ble designet for å kunne måle lydtrykk gjennom hele lengden av røret. For å kunne gjøre dette uten å påvirke lydfeltet i noen signifikant grad, ble det brukt et stålrør med en ytre diameter på 0,9 mm inne i resonatoren. Røret ble ført ned gjennom et lite hull i topplokket (Figur 4.3.9). Justeringen skjedde ved hjelp av en kloss som gikk på en skinne med et spor i. Mikrofonen ble plassert i et tilpasset hull i klossen, slik at det ble et tett kammer mellom munningen av røret og mikrofonen. På denne måten fikk man en spesiallaget sondemikrofon som kunne måle lydtrykket fra toppen og ned til elementet.



Figur 4.3.9. Topplukk med alt utstyr.

4.4 Testing av akustisk kjøler

4.4.1 Oppkobling og utstyr

Gjennom de forskjellige testene som har blitt utført, har det vært brukt forskjellige oppkoblinger. Utstyret for å forsyne høyttaleren med signal, samt for å måle lydtrykk, ble imidlertid valgt ut og satt opp helt i starten. Dette utstyret har vært det samme gjennom alle testene for å unngå feilkilder. Det bestod av en signalgenerator, en frekvensteller, en effektforsterker og et voltmeter. Signalgeneratoren produserte en sinus i justerbar frekvens. Fra denne gikk det en ledning til en t-kobling der den ene grenen gikk til en frekvensteller og den andre til effektforsterkeren. Frekvenstilleren ble brukt for å ha bedre kontroll på hvilken frekvens som ble matet inn i systemet. I serie med utgangen på effektforsterkeren ble det satt et voltmeter for å kunne overvåke spenningen på signalet som ble sendt til kjøleren. Siden motsanden er konstant ved en gitt frekvens vil man da kunne beregne effekten. Videre var det utstyr for å måle lydtrykket i røret. Dette bestod av en kondensatormikrofon og en måleforsterker. Den samme kondensatormikrofonen ble brukt til både den korte og den lange sonden.

For temperaturmålinger ble det brukt tre forskjellige instrumenter. I første omgang av testingen var det tilstrekkelig med et vanlig inne/ute-termometer. Dette ble benyttet fordi det hadde små sensorer som det var enkelt å forlenge. Dermed var det mulig å måle temperaturforskjellen ved forskjellige stakkposisjoner. Termometeret var også billig og enkelt å modifisere. I de senere testene ble det brukt mer nøyaktige termometer med raskere måleintervaller for å få mer presise resultater.

Under målingen av frekvensfordelingen, ble en frekvensanalysator koblet til utgangen av måleforsterkeren. På denne måten kunne man fortsatt se lydtrykksnivået mens man målte frekvensfordelingen i røret.

Produsent	Type	Beskrivelse	Typenummer
Wavetek	Lin/Log Sweep Generator	Signalgenerator	Model 135
Advance Instruments	Timer Counter	Frekvensteller	TC13
Adyton	Dynergy	Effektforsterker	SA 1000
Brüel & Kjær	Electronic Voltmeter	Voltmeter	Type 2409
Brüel & Kjær	Condenser Microphone	Mikrofon	Type 4134
Brüel & Kjær	Measuring Amplifier	Måleforsterker	Type 2606
Ono Sokki	FFT Analyzer	Frekvensanalysator	CF 940
Oltronix	Power Supply	Strømforsyning varmetråd	B60-1T
Termometer	Thermo Meter	Inne Ute Termometer	36-1270
Fluke	True RMS Multimeter	Multimeter Temperatur	179
Fluke	Multimeter	Multimeter Strøm	77
Fluke	IR Thermometer	Ir termometer	68
Clas Ohlson	Thermo	Termometer	Standard SD-612
Genelec	Active Monitor	Kalibreringsmonitor	Model 1029A
Brüel & Kjær	Sine Generator	Sinusgenerator til kalibrering	Type 1023
Brüel & Kjær	Measuring Amplifier	Måleforsterker til kalibrering	Type 2606
Brüel & Kjær	Condenser Microphone	Mikrofon til kalibrering	Type 4134
Brüel & Kjær	Sound Level Calibrator	Kalibrator for mikrofon	Type 4231

Tabell 4.4.1. Utstyrliste.

4.4.2 Akustisk driver

Hvilken akustisk driver som var den best egnede for kjøleren ble funnet ved å teste begge elementene montert på samme måte. Ved å måle både spenning over inngangen på elementet og strømmen som gikk igjennom, var det mulig å regne ut lydeffekt i forhold til inneffekt. Dette ble brukt for å unngå at det ble sendt for stor effekt gjennom spolen. Testen foregikk ved å finne resonans for deretter å skru opp effekten mest mulig uten at elementene ble forvrengt eller gikk over maksimal slaglengde. Ved dette nivået ble lydtrykket i røret målt. Mikrofonen i toppen med den korte sonden ble brukt til målingen fordi trykket er størst i toppen av røret ved kvartbølgeresonans. Det var ikke nødvendig å måle lydtrykket i hele røret, siden det høyeste trykket i toppen også ville gitt det høyeste trykket nedover langs røret.

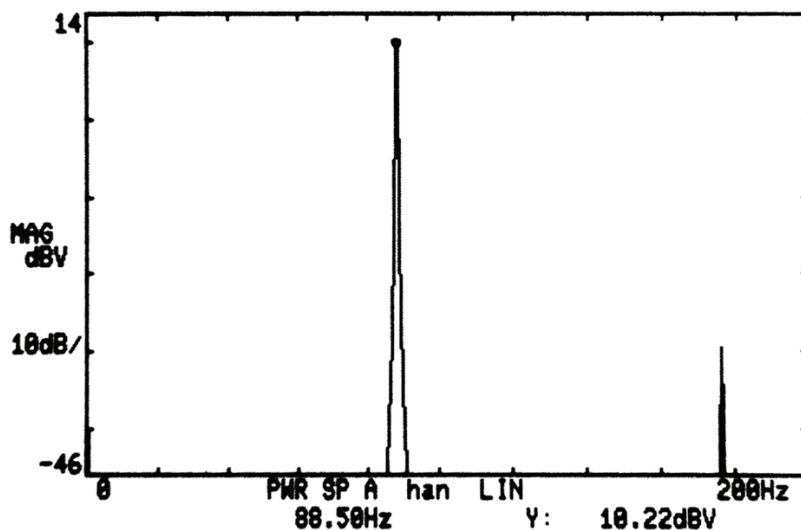
Testene av de to elementene viste at det var Dynabel-elementet som klarte å levere det høyeste lydtrykket ved 88,5 Hz. Ved maksimalt lydtrykk ble effekten skrudd opp slik at elementet akkurat ikke gikk over sin egen maksimale lineære slaglengde. Lydtrykksnivået ble da målt til 162 dB. SEAS elementet oppførte seg ikke på samme måte. Det høyeste lydtrykksnivået som ble målt med dette elementet var 157 dB ved 78 Hz. Lydtrykksnivået ved 88,5 Hz ble målt til 149 dB.

Dynabel elementet ble derfor valgt som akustisk driver i resten av testene.

4.4.3 Frekvensspekter

For å bekrefte med sikkerhet at moden som ble eksitert i røret virkelig var 90 Hz som antatt, ble det besluttet å måle frekvensspekteret i røret under normal operasjon. Dette ble gjort ved å koble en frekvensanalysator til mikrofonen. Systemet ble startet og frekvensen ble finjustert for å oppnå resonans. Deretter ble utgangssignalet fra mikrofonen analysert med FFT analysatoren.

Figur 4.4.1 viser magnitudo i forhold til frekvens, presentert med en lineær skala. Skalaen begynner på -46 dBV og hver strek utgjør 10 dBV, mens frekvensskalaen går fra 0 til 200 Hz og hver strek er 20 Hz. Man kan tydelig se kvartbølgeresonansen som er den første moden. Denne ligger på 88,5 Hz. Ved ca 177 Hz kan man se neste mode. Dette er trolig en halvbølgeresonans, men denne ligger ca 40 dBV lavere enn kvartbølgen.



Figur 4.4.1. Frekvensspekter i resonansrøret.

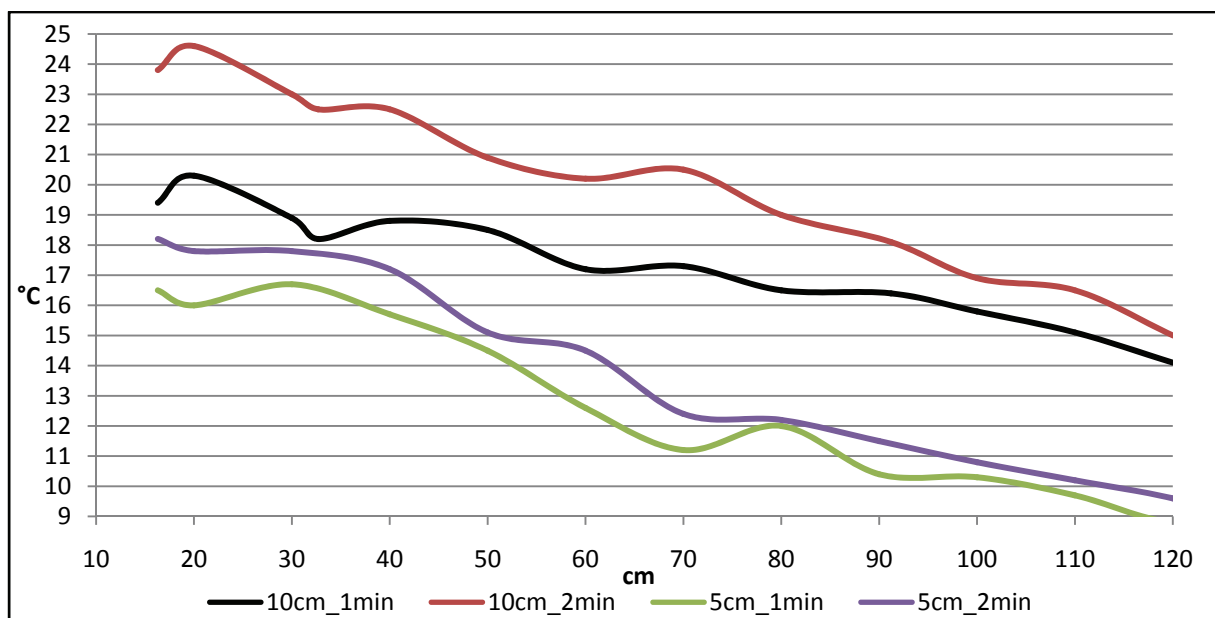
4.4.4 Stakkposisjon og lengde

Problemet under posisjonsoptimaliseringen i høstprosjektet var at stakkens oppheng begrenset bevegeligheten slik at det ikke var mulig å teste stakken gjennom hele røret. Den nye kjøleren ble bygget slik at stakken kunne plasseres fritt. Posisjonsoptimaliseringen kan vise sammenhengen mellom posisjonen i røret og ytelsen til systemet. Den andre hensikten med posisjonsoptimaliseringen, er å maksimere systemets ytelse slik at videre testing av kjøleeffekt blir enklere. En for lav kjøleeffekt vil føre til at det blir vanskelig å måle den på grunn av varmelekkasjer og andre feilkilder.

Grunnet teorien om at stakken kunne forårsake uønskede viskøse tap på grunnlag av at den var for lang ble det besluttet å skjære den i to for å teste en stakk av halve lengden. Flere av de videre testene ble gjort med begge lengdene for å undersøke hvordan lengden av stakken påvirket resultatene.

Testingen av optimal posisjon foregikk ved at frekvensen ble satt slik at systemet var i resonans. Lydtrykket ble satt høyt, men ikke maksimalt. Deretter ble stakken flyttet stegvis gjennom røret. Ved hver posisjon ble strømmen skrudd på og en klokke startet. Ved 1 minutt og 2 minutter ble temperatur i toppen og bunnen av stakken lest av. Mellom hver test ble systemet tilbakestilt. Det ble da slått av i ca 30 minutter slik at temperaturforskjellen jevnet seg ut og temperaturene ble stabile. Denne testen ble gjort med begge stakklengdene for å vise eventuelle forskjeller mellom dem.

Figur 4.4.2 viser oppnådde temperaturdifferanser som funksjon av stakkposisjon etter 1 og 2 minutter målt med begge lengder av stakken. Man kan se hvordan ytelsen øker når stakken kommer nærmere toppen av resonatoren. Det vises også at stakken på 10 cm har den høyeste temperaturdifferansen med en topp på ca 24 grader etter 2 minutter. Den var da plassert 2 cm fra topplokket. Figuren viser også at forskjellen mellom 1 og 2 minutter blir større når stakken på 10 cm blir brukt.



Figur 4.4.2. Temperaturdifferanse på posisjon ved forskjellig stakklengder etter 1 og 2 minutter.

4.4.5 Måling av absorpsjonsfaktor med tomikrofonmetoden

Tomikrofonmetoden ble valgt for å undersøke de akustiske egenskapene til Celcorstakken. Dette var relevant for å finne ut hvilken effekt stakkens egenskaper hadde på ytelsen som funksjon av plassering.

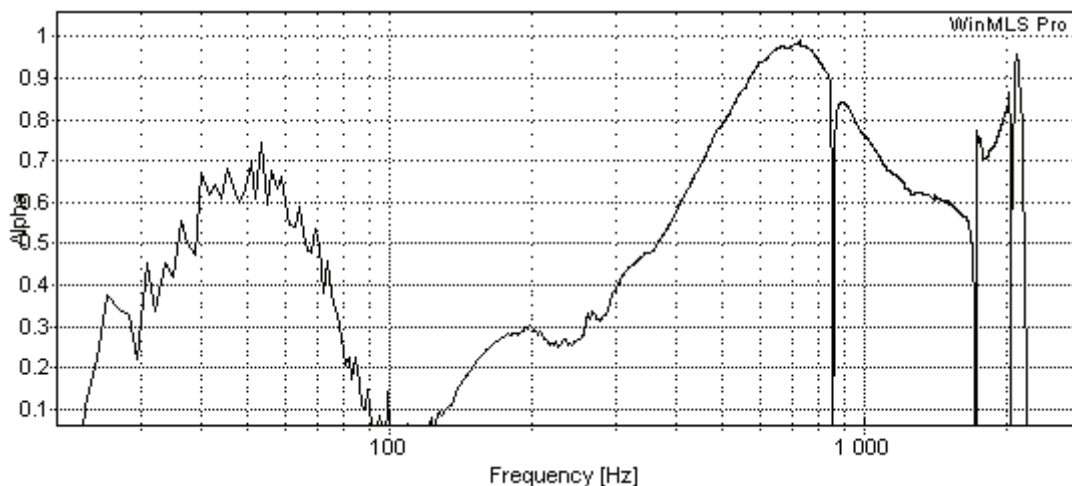
Stakken hadde riktige mål slik at den passet inn i enden av røret i testapparatet. For å unngå lydlekkasjer ble det smurt vaselin rundt stakken og i koblingene mellom stakken og enden av røret. De to mikrofonene ble koblet til et eksternt lydkort og en PC som styrte og analyserte målingene. Først måtte mikrofonene kalibreres. Dette ble først gjort med begge mikrofonene. Det ble deretter byttet plass på mikrofonene og kalibreringen ble gjentatt. I begge tilfellene

ble det brukt en prøve med absorpsjon tilnærmet lik 1. I Figur 4.4.3 vises måleoppsettet med kalibreringsprøven og prøven av Celcor stående foran. Man kan se de to mikrofonene som går inn inn i røret samt forsterkeren til lydkilden. Prøven ble satt i inn venstre ende av røret i figuren.



Figur 4.4.3. Måleapparat for tomikrofonmetoden.

Selve testen var ganske ukomplisert når kalibreringen var ferdig. Det hele ble styrt fra datamaskinen med programmet WinMLS og et programtillegg som het "Material Acoustics_Standing Wave Tube ISO 10534-2". Testen ble kjørt tre ganger for å utelukke eventuelle variasjoner, men resultatene av alle tre testene ble de samme.



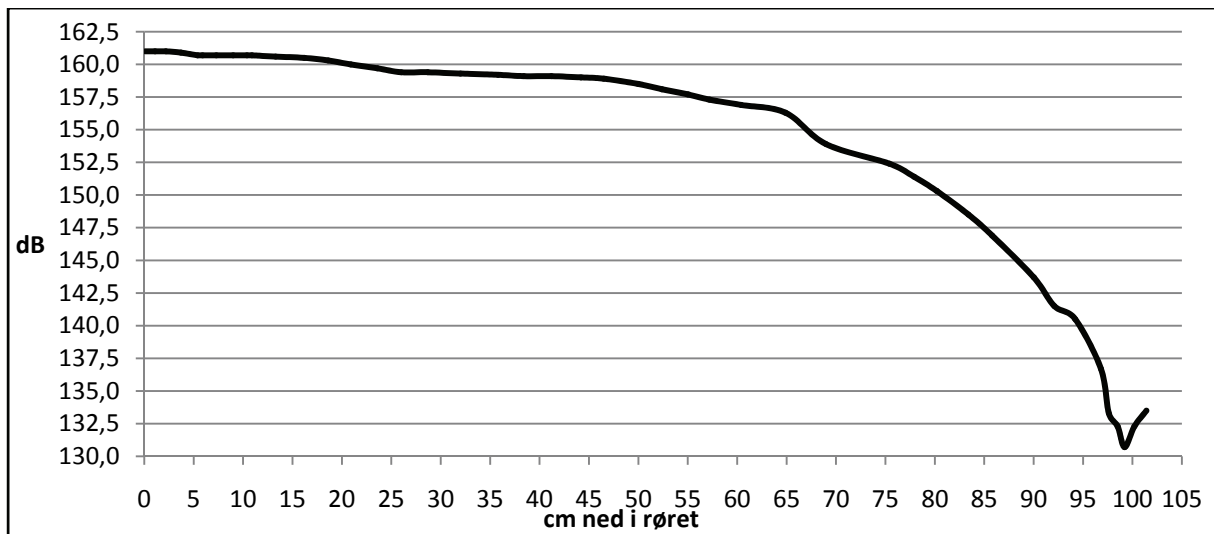
Figur 4.4.4. Akustisk absorpsjonskoeffisient i forhold til frekvens.

Som man kan se på Figur 4.4.4 er alfa meget lav fra ca 90 til litt over 100 Hz. Siden frekvensen som brukes i systemet er på ca 90 Hz, vil stakkens absorpsjon ligge på rundt 0,1 ved arbeidsfrekvensen til systemet. Dette tyder på at stakkens akustiske absorpsjon ikke påvirker plasseringen i nevneverdig grad.

4.4.6 Trykkfordeling

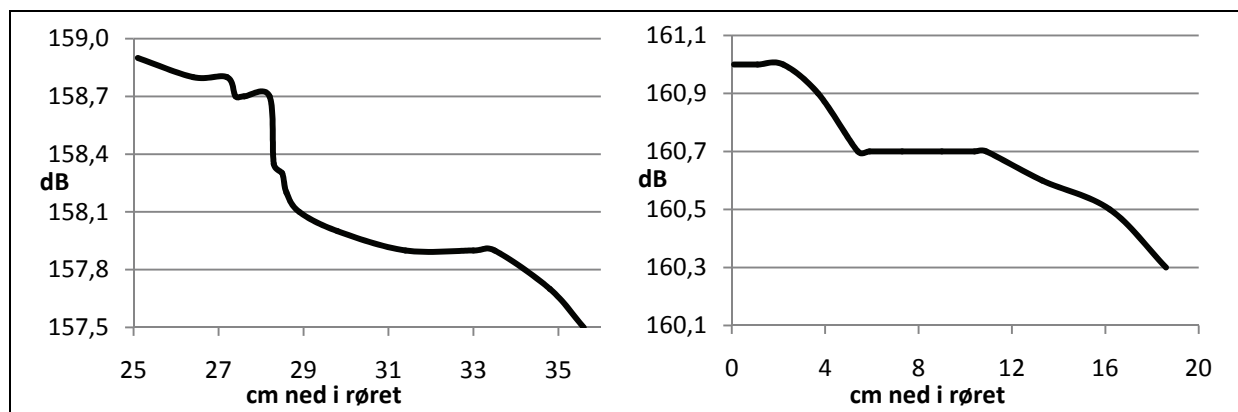
Ved hjelp av måling av trykkfordeling gjennom røret kunne man verifisere at det var en kvartbølge som oppstod. Dette ble gjennomført med den spesiellagede sondemikrofonen. Lyden ble skrudd til ca 80 % av maksimalt lydtrykk for å unngå eventuell forvrengning. Frekvensen ble justert slik at systemet resonerte. Først ble sondemikrofonen kalibrert mot mikrofonen i topplokket. Det ble brukt samme mikrofon ved disse målingene. Mikrofonen ble flyttet mellom stativet i topplokket og den lange sonden. For å kalibrere, ble først lydtrykket målt med den korte sonden nær toppen. Så ble mikrofonen flyttet mellom de to holderne og den lange sonden plassert så nær den korte sonden som mulig. Lydtrykket ble avlest og differansen mellom de to målingene ble kalkulert. Det ble antatt at lydtrykket var det samme ved de to sondenes åpning slik at differansen kunne brukes som en offset på målingene med den lange sonden.

Under målingen ble sondemikrofonen flyttet i steg på ca 2 cm og lydtrykket ble avlest. Resultatet vises i Figur 4.4.5. Man kan tydelig se at grafen former en kvartbølge. Hvis systemet hadde vært ideelt, ville lydtrykket vært null ved elementet og maks i toppen, men dette er ikke praktisk mulig. En forskjell på ca 30 dB mellom maksimalt og minimalt lydtrykk er imidlertid et tydelig resultat. I den siste avlesningen der man kan se at grafen begynner å peke oppover, hadde sonden kommet ut av røret og var nesten helt inntil membranen.



Figur 4.4.5. Trykkfordeling gjennom hele røret.

Lydtrykket inne i og rundt stakken ble antatt å kunne fortelle noe om stakkens akustiske egenskaper. Det ble derfor gjort flere målinger i området over, under og inne i stakken for å studere hvilken effekt den hadde på lydfeltet.



Figur 4.4.6. Trykkfordeling rundt stakk.

Grafene i Figur 4.4.6 viser to forskjellige målinger av trykkfordelingen rundt stakken. I grafen til venstre lå stakken mellom 28 og 33 cm. Man kan her se at trykket går ned med ca 0,8 dB inne i stakken. Grafen til høyre viser trykket når stakken var plassert mellom 5 og 10 cm. Også her kan man se at lydtrykket faller inne i stakken. Trykket synker her med ca 0,3 dB. I begge grafene stiger lydtrykket igjen når sonden kommer ut av stakken.

4.4.7 Varmeoverføringskoeffisient

Den potensielt sett største feilkilden under måling av kjøleeffekt ble antatt å være varmelekkasje gjennom den relativt tynne og uisolerte rørveggen. Ved høye temperaturer inne i røret kunne varmestrømmen gjennom veggen bli dominerende og ødelegge gyldigheten av effektmålingene. Varmestrømmen ut av rørveggen ved varmetråden ville ha blitt feiltolket som kjøleeffekt hvis den ikke hadde blitt tatt hensyn til.

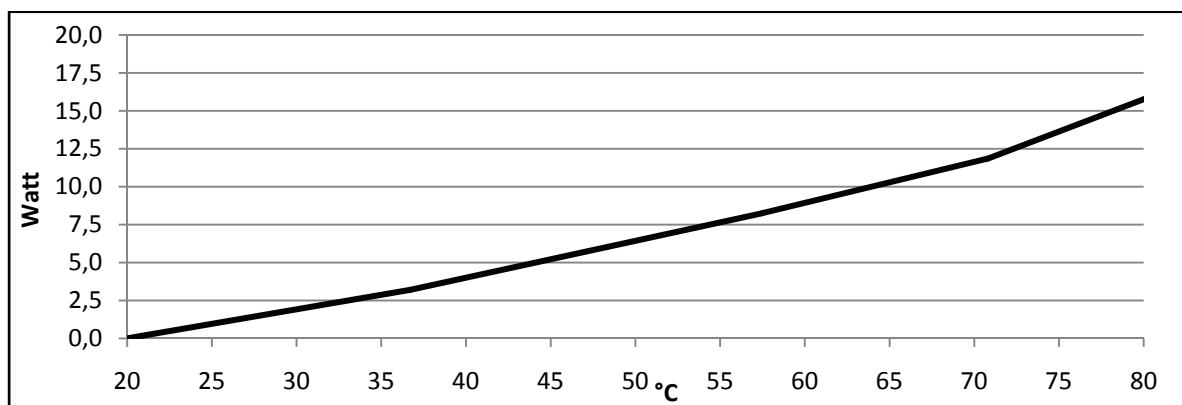
Varmeoverføringskoeffisienten ble funnet ved å måle temperaturene inni og utenfor røret uten noen akustisk kjøling ved flere forskjellige effekter i varmetråden. Varmetråden ble koblet gjennom et amperemeter til en strømkilde. På denne måten hadde man til en hver tid kontroll på hvor mange watt som ble avgitt som varme inne i røret. Temperatursensorer ble plassert mellom viklingene til varmetråden, i friluft utenfor kjøleren, samt inne mellom finnene i varmeveksleren. Først ble en gitt strøm gjennom trådene slått på. Deretter fikk temperaturene i røret stabilisere seg før temperatursensorene ble lest av. Det tok ca 2 timer før temperaturen ble stabil. Ved en stabil temperatur inne i røret vet man at all varmen som avgis inne i røret går ut gjennom rørveggene. Varmestrømmen ut av rørveggene blir da den samme som den tilførte effekten i varmetråden. Det ble forsøkt å skru på vannet i varmeveksleren for å se om en kald varmeveksler ga noen kjøleeffekt i varmetråden uten termoakustisk kjøling. Når vannet ble skrudd på gikk temperaturen i varmetråden ned med ca 1 grad celsius. Dette viser at det ikke var noen betydelig del av effekten som gikk inn i varmeveksleren grunnet konveksjon gjennom stakken. Med dette lagt til grunn ville det bli mer korrekt å tolke resultatene i ytelsestesten som reell akustisk kjøling.

T friluft	20,00	20,00	20,00	21,20	°C
T varmetråd	36,70	57,50	70,80	89,20	°C
Effekt	3,20	8,25	11,85	19,68	Watt
K	0,19	0,22	0,23	0,29	W/°C

Tabell 4.4.2. Utregnede koefisienter

Resultatene av målingene vises i Tabell 4.4.2. Gjennomsnittet av K-verdiene blir 0,23 W/°C med standardavvik på 0,04. Denne K-verdien ble brukt videre i beregningene av kjølerens effekt. I

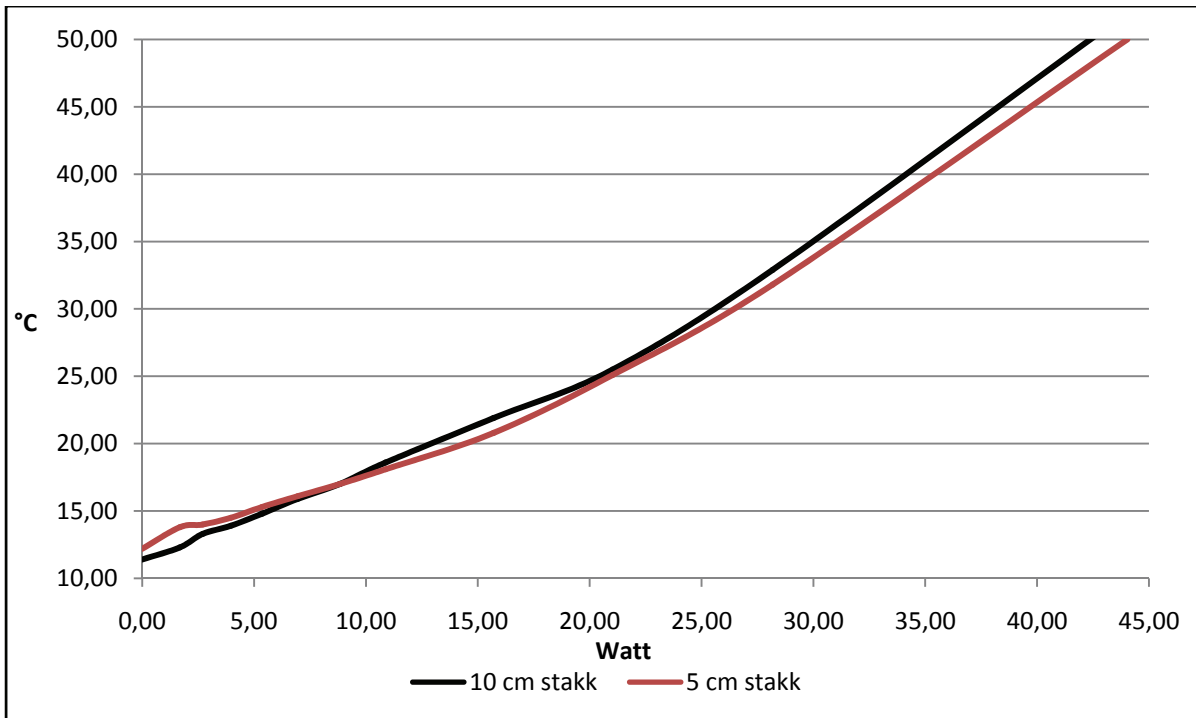
Figur 4.4.7 vises varmestrømmen gjennom rørveggen som funksjon av temperaturen inne i røret ved varmetråden. Man ser her at varmegjennomgangen øker tilnærmet lineært med temperaturen. Dette stemmer bra med teorien om varmestrøm. Dersom temperaturen rundt varmetråden skulle komme under temperaturen utenfor røret vil man fortsatt kunne bruke K verdien for å regne ut varmestrømmen. Varmen vil da gå inn i røret i stedet for ut, og den resulterende kjøleeffekten vil bli effekten i varmetråden pluss effekten som kommer inn gjennom rørveggen.



Figur 4.4.7. Varmestrøm gjennom rørveggen som funksjon av temperatur.

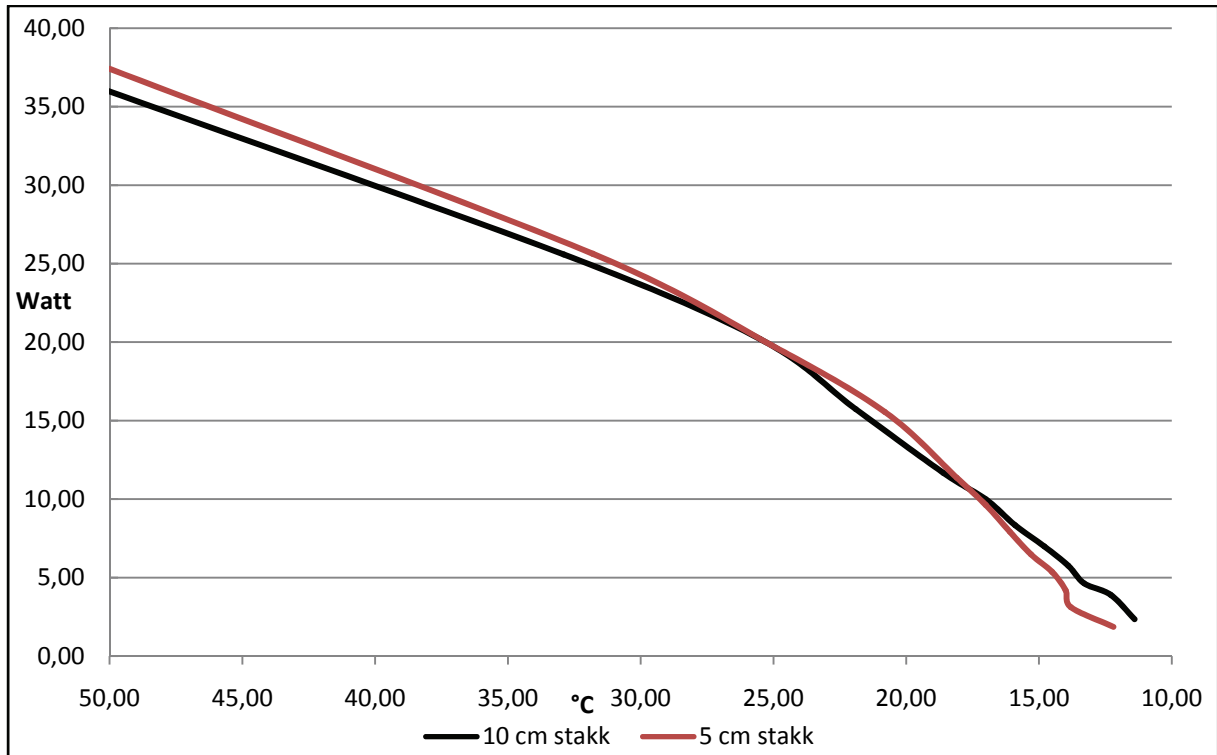
4.4.8 Kjøleeffekt og virkningsgrad

Kjøleeffekten til systemet ble målt med flere forskjellige effektlaste slik at man skulle kunne danne seg et bilde av kjølerens reelle ytelse. Målingen ble foretatt med begge lengdene av stakken for å gi et bilde av hvilke effekt stakklengden hadde på kjøleeffekten. En gitt effektlast resulterte i en temperatur som ble brukt videre i beregningene. Testene ble utført ved å sette på en strøm gjennom varmetråden og deretter skru på lyd og vannstrøm gjennom varmeveksleren. Siden det var vanskelig å få den samme vannstrømmen fra springen i hver test, ble den skrudd så høyt (>10 liter/minutt) at mindre variasjoner ikke fikk innvirkning på resultatene. I alle testene fikk systemet stå til temperaturene ble stabile før de ble avlest.



Figur 4.4.8. Temperatur som funksjon av effekt i varmetråd.

Målingene viser at temperaturen mellom viklingene av varmetråden stiger eksponentielt som funksjon av effekten i den (Figur 4.4.8). Denne figuren gir ikke direkte kjøleeffekten til kjøleren, men resultattemperaturen som funksjon av lasten den blir utsatt for.



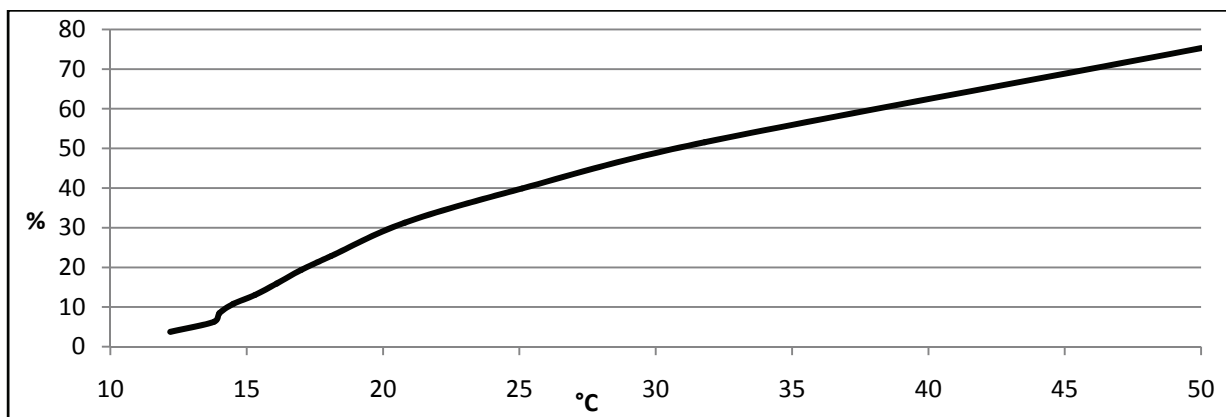
Figur 4.4.9. Kjøleeffekt som funksjon av måltemperatur.

I Figur 4.4.9 kan man se hvordan kjøleeffekten forandrer seg når temperaturen i varmetråden forandres. Som ventet synker kjøleeffekten ved lavere måltemperaturer. Grafen er tidvis

lineær, men kjøleeffekten avtar raskere ved lavere måltemperatur. I toppunktet av grafen ble det emittert 44 watt fra varmetråden. Dette resulterte i en kjøleeffekt på 37,5 watt ved 50 grader. Det var den høyeste målte kjøleeffekten. Denne ble oppnådd med stakken på 5 cm.

Forskjellen mellom stakken på 10 og 5 cm kan ses i begge figurene. I Figur 4.4.9 kan man observere at frem til ca 10 watt og 17 grader har stakken på 5 cm bedre kjøleeffekt per temperatur. Når temperaturen går under 17 grader har stakken på 10 cm den høyeste kjøleeffekten. Stakkene har ganske lik utvikling ved temperaturer over kryssingspunktet.

Virkningsgraden til systemet ble dels funnet ut fra resultatene av effektmålingene. I tillegg ble spenning og strøm gjennom høytalerelementet målt for å finne effekten inn. Virkningsgraden ble kjøleeffekten dividert med inneffekten.



Figur 4.4.10. Virkningsgrad med 5 cm stakk som funksjon av måltemperatur.

Formen på kurven over virkningsgraden (Figur 4.4.10) ble som ventet lik effektkurven, men med prosent på y-aksen.

4.5 Systemtest

For å kunne studere hvordan systemet fungerte i sin helhet ble det foretatt langtester av alle funksjonene. Her ble de forskjellige systemene slått på i en bestemt rekkefølge og temperaturene lest av i intervaller for å følge utviklingen. På denne måten ble det vist hvordan de forskjellige systemene gjorde utslag på temperaturene. Det ble forsøkt å skru på ting i forskjellig rekkefølge for å studere ulike overganger mellom systemene. I disse testene ble det brukt 5 cm lang stakk. Testene ble ikke gjentatt med 10 cm lang stakk siden det var overgangene mellom de forskjellige fasene og ikke maksimal ytelse som var interessant.

4.5.1 Test 1

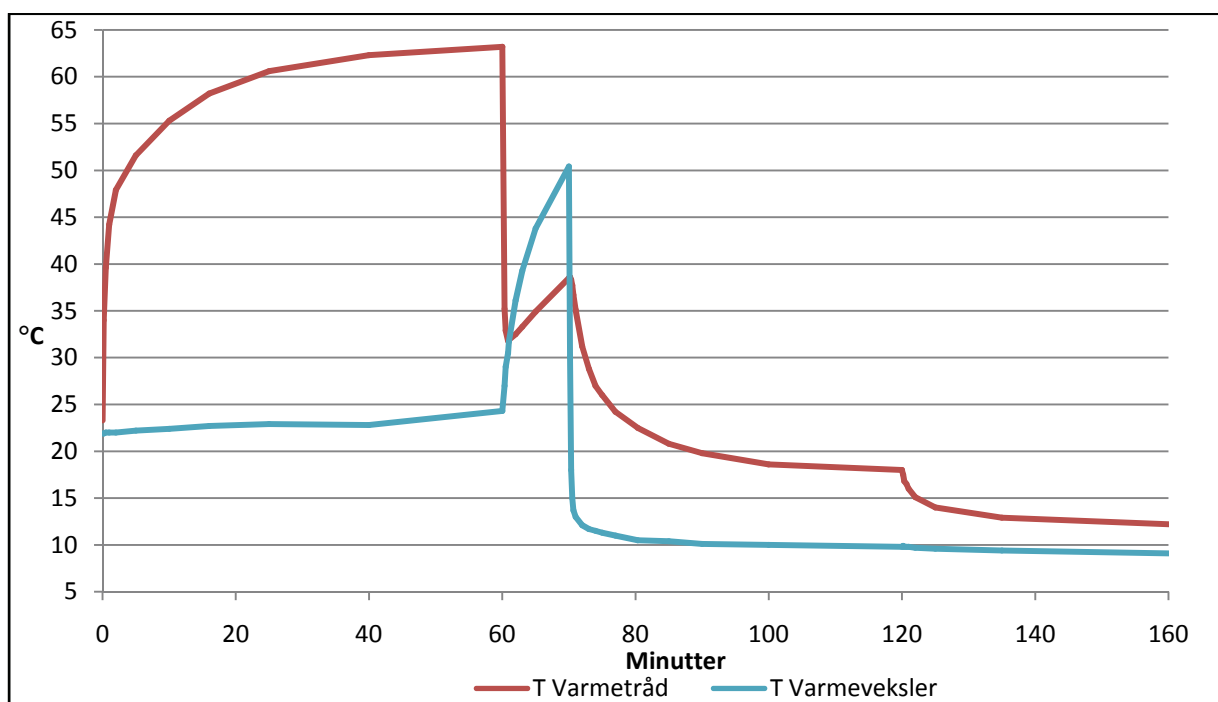
I den første testen var varmetråden det første som ble aktivert. Alle temperaturene ble avlest i intervaller. Når det ble foretatt en endring var avlesningene hyppigere, grunnet logaritmisk utvikling. Når temperaturen hadde stabilisert seg etter 60 minutter ble lyden skrudd på. Vannet ble skrudd på etter 70 minutter. Etter at de første 60 minuttene var passert var det den termoakustiske kjølingen som flyttet varmen fra varmetråden til varmeveksleren der varmen gikk over i vannet. Systemet ble kjørt så på denne måten i 60 minutter til temperaturene hadde stabilisert seg. På dette punktet ble det gjort en avlesning for å regne ut kjøleeffekt. Ved 120

minutter ble varmetråden skrudd av. Dette ble gjort for å se hvor lav temperatur kjøleren kunne oppnå uten last.

Test	Frekvens	Lydtrykk	Effekt inn	Vannstrøm	Romtemp	Vanntemp
1	88 Hz	159,8 dB	11,1 watt	9,6 l/min	22,8 °C	3,6 °C

Tabell 4.5.1. Testparametre for test 1.

I Tabell 4.5.1 vises parametrene for den første testen av systemet. Frekvens, lydtrykk og effekt ble justert inn på forsterker og signalgenerator mens vannstrømmen og vanntemperaturen ble målt. For å måle vannstrømmen ble den utgående vannstrålen ledet opp i en bøtte i 30 sekunder. Deretter ble innholdet i bøtten målt med et litermål og resultatet ble ganget med to. For å måle vanntemperaturen ble det brukt et IR-termometer på selve vannstrålen.



Figur 4.5.1. Temperaturutvikling i varmetråd og varmeveksler test 1.

Resultatet av den første systemtesten vises i Figur 4.5.1. Man kan se hvordan varmetråden varmer opp systemet til nesten 65 grader før lyden settes på. Med lyd i systemet synker temperaturen ved varmetråden fort ned til ca 32 grader før den begynner å stige igjen.

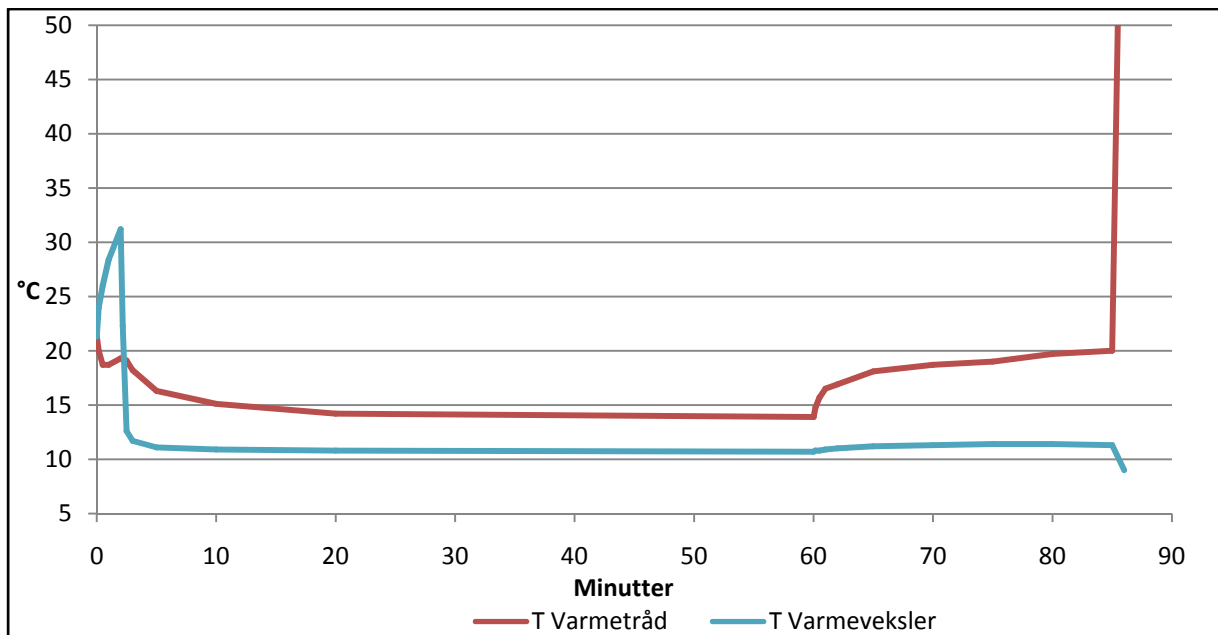
Temperaturen ved varmeveksleren holder seg tilnærmet konstant før lyden slås på. Når den akustiske kjølingen begynner å virke, kan man se at den stiger hurtig til man har en temperaturdifferanse på ca 10 grader. Etter dette begynner temperaturen å stige på begge sider. Når vannet blir skrudd på ser man tydelig hvordan temperaturen ved varmeveksleren synker fort til ca 10 grader. Temperaturen ved varmetråden synker også, men ikke like hurtig. Etter 120 minutter har temperaturen ved varmetråden stabilisert seg på ca 18 grader. Dette er fortsatt varmere enn temperaturen i varm side av stakken som er på ca 10 grader. Når varmetråden skues av og systemet får stabilisert seg, har temperaturen ved varmetråden sunket til ca 12 grader. Man kan også se en nedgang på ca 1 grad ved varmeveksleren. Etter 160 minutter ble testen avsluttet.

4.5.2 Test 2

Den andre testen er basert på et litt annet tilfelle der kjølesystemet er på når varmetråden settes på. Det vil si at lyden og vannet ble skrudd på først. Etter at systemet stabiliserte seg ble varmetråden skrudd på. Testparametrene vises i Tabell 4.5.2.

Test	Frekvens	Lydtrykk	Effekt inn	Vannstrøm	Romtemp	Vanntemp
2	88 Hz	159,5 dB	11 watt	11,4 l/min	21,8 °C	4,3 °C

Tabell 4.5.2. Testparametre for test 2.



Figur 4.5.2. Temperaturutvikling i varmetråd og varmeveksler test 2.

Som vist i Figur 4.5.2 stabiliserer temperaturen seg på ca 14 grader når varmelasten ikke står på. Etter 60 minutter ble varmen skrudd på og man kan tydelig se hvordan temperaturen stiger. Etter ca 85 minutter var temperaturen i varmetråden stabil på 20 grader. Siden omgivelsestemperaturen ble målt til ca 20 grader betyr dette at den termoakustiske kjøleren transporterer omtrent all effekten som emitteres i varmetråden til varmeveksleren. Etter 85 minutter skrur lyden av og man kan tydelig se hvordan temperaturen i varmetråden stiger hurtig. Toppen i starten av grafen skyldes at lyden ble satt på 2 minutter før vannet. Overgangen er den samme som vises mellom 60 og 70 minutter i test nummer 1, uten at varmetråden står på.

5 Diskusjon

5.1 Frekvens

Hovedmålet med simuleringen av kjøleren var å finne ut hvilken lengde av røret som tilsvarte en gitt frekvens. Det ble prøvd to forskjellige fremgangsmåter for å finne lengden. Egenverdisimulering og tidsharmonisk simulering med en gitt påtrykt frekvens. Under simuleringen av egenverdiene ble de fysiske proporsjonene til røret lagt inn i programmet og simuleringen returnerte de forskjellige mulige modene i strukturen. Resultatet fra denne simuleringen var imidlertid ikke i tråd med svarene fra den tidsharmoniske simuleringen. De var heller ikke like hver gang. Det ble forsøkt å sammenlikne simuleringsresultatene med kalkulasjoner av lengden på en kvartbølge ved gitt frekvens for å finne hvilken simuleringstype som ga det mest fornuftige resultatet. Det ble da funnet at den tidsharmoniske simuleringen var den beste. Denne simuleringen ga også like svar ved gjentatte simuleringer med samme parametre.

Ved simuleringene fant man at en frekvens på 90 Hz, som ble kalkulert som den optimale frekvensen for stakken, ga kvartbølgeresonans. Rørlengden var da på 98,3 cm. Frekvensen på 88,5 Hz, som ble funnet under frekvensanalysen ved resonans, stemmer bra med den beregnede resonansfrekvensen. Forskjellen mellom simulert verdi og frekvensen brukt i kalkulasjonene av inntrengningsdybde blir på 1,7 %. Avviket på kalkulasjonene av inntrengningsdybde blir derfor minimalt, og man vil kunne få tilnærmet optimal varmeoverføring fra gassen til stakken.

5.2 Akustisk driver

Valget av akustisk driver ble tatt ut ifra det maksimale lydtrykket elementene var i stand til å produsere i røret ved arbeidsfrekvensen på 88,5 Hz. Under testingen av SEAS-elementet ble det funnet at det høyeste lydtrykket oppstod ved 78 Hz. Dette stemmer ikke med tidligere antakelser og utregninger om resonansfrekvens. Grunnen til at dette elementet fikk en større utsving ved denne frekvensen antas å være at kassen ble designet til Dynabel elementet. Siden SEAS-elementets parametre er såpass forskjellige fra det andre elementet, ga kassen resonans ved en annen frekvens. Dette kan ha overstyrt resonansen i røret. SEAS-elementet er også en mer utpreget subbass og er derfor laget for å spille ekstra høyt på de dypeste frekvensene. PA-elementet fra Dynabel er laget for å spille høyest mulig, med fokus på lysere bass og mellomtone. På grunn av dette vil Dynabel-elementet være bedre egnet for maksimalt lydtrykk ved 88,5 Hz. Det var på grunn av dette samt resultatet av testene at Dynabel-elementet ble valgt.

5.3 Stakkposisjon

En stakk i en termoakustisk kjøler vil teoretisk sett yte best når lydtrykket er høyt. Volumhastigheten rundt og inni den må være så stor at volumutsvinget, altså forflytningen av gassen, blir tilstrekkelig for å få i gang en forflytting av varme. Nær enden av resonatoren vil det være maksimalt trykk, men liten volumhastighet, mens nær driverelementet vil man ha maksimal volumhastighet, men et lavere trykk. Etter målingene av optimal posisjon for

stakken som viste at stakken hadde best ytelse nesten i toppen av røret, ble flere mulig årsaker vurdert. En teori var at stakkens egenskaper ville påvirke lyden i røret. Grunnet stakkens lave perforering på ca 50 % var tanken at den akustiske dempningen ble høy på grunn av viskøse tap i kanalene.

5.3.1 Tomikrofonmetoden

Selv om en høy dempning ikke ville ha gitt noen fullstendig forklaring av fenomenet med ytelsen i forhold til plasseringen, ble det bestemt å teste stakkens akustiske egenskaper med tomikrofonmetoden.

Ut ifra resultatet kan det tolkes at stakken ikke påvirker lydfeltet i betydelig grad. Grafen med dempningskonstanten som funksjon av frekvens (Figur 4.4.4), viser at dempningen er lav ved aktuell frekvens. Ved denne målingen kan man imidlertid ikke vite om bølgene reflekteres direkte fra overflaten til prøven eller om de går inn i kanalene, reflekteres i bakveggen og kommer tilbake gjennom kanalene før de treffer mikrofonen. Det var ingen konfigurering i testrutinen som fortalte systemet hvor dyp prøven var. Dermed kunne analysen ikke ha avgjort om refleksjonen kom fra bakveggen eller fra fronten av prøven. Det ble derfor vurdert om prøven av Celcor kunne ha en veldig høy refleksjonsfaktor, og at metoden feilaktig tolket dette som lav dempning. Teorien var at hvis stakken hadde hatt en refleksjonsfaktor på 1 ville all lyden blitt reflektert tilbake og dempningen ville blitt målt til 0. Dette var årsaken til at det ble besluttet å teste trykkfordelingen gjennom hele røret med spesiell vekt rundt og inne i stakken.

5.3.2 Trykkfordeling

Trykkfordelingen ga i tillegg til et mål av stakkens dempning og refleksjonsfaktor en grafisk fremstilling av hvilken bølgeform som oppstod i røret. Testen av trykkfordeling gjennom røret viser at antakelsene om at det ville oppstå en kvartbølgeresonans var riktig. Man kan tydelig se at bølgeformen i røret samsvarer med en kvart bølgelengde. En kvart bølgelengde på 88,5 Hz er det samme som 97,2 cm når lyd hastigheten er 344 m/s (20 °C). Under operasjon økte snittemperaturen i kjøleren noe, som vil føre til at lyd hastigheten stiger og en kvartbølgeresonans vil bli lengre. En temperaturøkning fra 20 til 30 grader vil føre til at en kvartbølge ved 88,5 Hz blir 98,7 cm lang. Dette er bare 0,4 % mer enn den optimale lengden på 98,3 cm som ble funnet i simuleringene.

Den lille stigningen i slutten av linjen i Figur 4.4.5 kan forklares med at i dette punktet gikk sonden ut av røret og inn i volumet mellom røret og elementet. I dette området vil ikke lydtrykket lengre synke slik som i kvartbølgen. Dette skyldes trolig alle overflater og ujevnheter som kan skape støy av både turbulens og refleksjoner fra kantene som igjen kan øke det målte lydtrykket i området.

Trykkfordelingen ble målt ekstra nøye rundt og inni stakken for å kunne avgjøre teorien om stakkens refleksjonsfaktor. I en trykkfordeling uten stakk ville man fått en glatt kvartbølge. Det ville da være rimelig å tro at dersom en stakk ikke innførte dempning eller refleksjon i systemet, ville trykkfordelingen med stakk i røret få samme form som en trykkfordeling uten

stakk. I resultatet fra testene kan man se hvordan trykket faktisk er det samme over og under stakken. Dette leder en til å tro at stakken ikke innførte noen dempning eller refleksjon. Man kan imidlertid også se hvordan lydtrykket blir lavere inne i stakken for så å stige igjen når sonden kommer ut av stakken. Dette kan tyde på at stakken faktisk har en målbar dempning eller refleksjon. Grunnen til dette kan imidlertid være at sonden tettet den kanalen den var i, slik at lyden som ville ha kommet ovenfra ikke ble målt. På denne måten måles kun lydbølgene som kommer nedenifra og ikke de som reflekteres ifra toppen når sonden befant seg inne i en kanal i stakken. Sonden vil da fungere litt på samme måte som en direktiv mikrofon.

Forskjellen mellom de to finmålingene av trykkfordeling rundt stakken kan forklares med hvor i røret stakken stod under målingen. I grafen til venstre i Figur 4.4.6 stod stakken lengre mot elementet enn i grafen til høyre. Fallet i denne grafen var ca 3 ganger høyere enn i den andre. Dette skyldes trolig at når stakken befant seg lengre mot elementet, lå den også lengre borte fra kvartbølgens maksimum. Trykkøkningen er størst ved elementet og avtar gradvis når man nærmer seg topplokket av kjøleren og kvartbølgens maksimum. Dette medfører at trykkforskjellen over stakken varierer i forhold til posisjonen. En større trykkforskjell fører til at blokkeringen av bidraget fra toppen har større innvirkning og resulterer dermed i en større dempning av målt verdi.

På grunnlag av målingen med tomikrofonmetoden og målingen av trykkfordeling ble teorien om at stakken hadde høy refleksjonsfaktor eller mye akustisk dempning ved 90 Hz forkastet. Ingen av resultatene ga noen entydig indikasjon på at dette var tilfelle. Grunnen til den gode ytelsen med stakken nesten helt i toppen av røret ble dermed ikke funnet analytisk.

Det ble imidlertid konstatert at volumhastigheten i det punktet stakken hadde best ytelse ikke kunne være lik null, da man ikke ville fått noen kjøleeffekt. Det høye lydtrykket og innsnevringen av røret ga trolig en partikkelbevegelse som var stor nok selv i toppen av røret. I kombinasjon med at lydtrykket var størst på nesten samme sted oppnådde man optimal effekt nesten i toppen.

5.4 Varmeroverføringskoeffisient

Som tidligere nevnt vil varmeoverføringen mellom innsiden og utsiden av røret potensielt sett kunne utgjøre den største feilkilden. Det var derfor viktig å finne et godt mål for hvor stor denne overføringen var.

Målingene av varmeoverføringskoeffisienten ble gjort med varierende effekt i varmetråden. Man kan tydelig se en tendens til at varmeoverføringskoeffisienten blir høyere per watt når antall watt øker (Figur 4.4.7). Dette er trolig grunnet strålevarme fra varmetråden til temperatursensoren. I følge Stefan Boltzmans lov vil utstrålingen fra et legeme øke med fjerde potens av legemets absolutte temperatur [14]. Dette medfører at en dobling av et legemes temperatur vil føre til at strålingen fra dette legemet blir 16 ganger større. Det ble likevel valgt å bruke snittet av alle målingene i forsøket. Dette på grunn av de lave temperaturene i systemet. Siden det samme termometeret på samme plass skulle brukes i alle

testene ville strålingen påvirke i samme grad under disse målingene og til en viss grad utlikne feilen.

Resultatet på $0,23 \text{ W/}^\circ\text{C}$ med standardavvik på $0,04$ virker som et fornuftig resultat. Et enkelt vindusglass har ca $2,3 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$ og et dobbeltvindu har ca $1 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$ [7]. Hvis man vil sammenlikne resultatet fra kjøleren med disse må man dele $0,23 \text{ W/}^\circ\text{C}$ med overflaten av røret. Dette gir en varmeoverføring på $0,75 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$. Disse to tallene er imidlertid fortsatt ikke direkte sammenlignbare. Dette fordi temperaturløstet som brukes når man regner ut K finnes fra temperaturen i det varmeste området i røret. Siden varmen ikke fordeles likt utover flaten inne i røret burde temperaturen egentlig ha vært et snitt av temperaturen i hele røret.

Tykkelsen av veggen og varmeledningsevnen vil også påvirke varmetransporten ut gjennom rørveggen. Hvis man sammenlikner den termiske konduktiviteten til akrylglass og vanlig glass finner man at vanlig glass som har en termisk konduktivitet på ca $1,1 \text{ watt/mK}$, leder varme ca 5 ganger bedre enn akrylglass som har en konduktivitet på $0,2 \text{ watt/mK}$. Disse verdiene er avhengig av temperaturløstet og tykkelsen på materialet. Når man tar dette i betraktning er den målte verdien av K troverdig.

5.5 Kjøleeffekt og virkningsgrad

Kjøleeffekten til et kjøleapparat vil som beskrevet i avsnitt 3.6 alltid være avhengig av temperaturen man skal ned til. I resultatene fra målingene av kjøleeffekt kan man tydelig se hvordan den øker når temperaturen i varmetråden går opp. Økt temperatur rundt varmetråden betyr økt temperatur på gassen som entrer varmeveksleren, som igjen betyr at varmeveksleren blir mer effektiv siden den klarer å føre en større varmemengde ut av røret. Dette vises i Figur 4.4.9 der kjøleeffekt er presentert i forhold til måltemperatur. Målingene viser også at kjøleeffekten ikke øker proporsjonalt med temperaturøkningen. Dette er som omtalt tidligere på grunn av varmetransporten gjennom rørveggen som øker ved økt temperaturløstet mellom innsiden og utsiden av røret.

I Figur 4.4.8 som viser temperatur i forhold til effekt i varmetråden, kan man se at temperaturen utvikler seg eksponentielt med økt effekt. Her skjer trolig det samme som skjedde når effekten ble økt under målingen av varmeoverføringskoeffisienten. Varmestrålingen øker eksponentielt og sørger for at temperaturen ikke følger effekten lineært.

Man kan også observere at kjøleren ikke klarer temperaturer under ca 11 grader uten last (10 cm stakk). Dette er på grunn av varmetransporten inn i røret fra utsiden. Når temperaturen inne i røret synker under temperaturen utenfor, vil varmemstrømmen snu og kjøleeffekten blir lik varmemstrømmen inn i røret. Denne ble funnet ved bruk av varmeoverføringskoeffisienten. Hvis man hadde isolert rørveggen ville varmetransporten inn i røret blitt lavere, og den resulterende temperaturen ville sunket. Dette ville igjen ført til lavere temperatur i varmeveksleren som hadde senket den totale kjøleeffekten.

Hvis man studerer forskjellen mellom de to lengdene av stakken kan man se at det største avviket mellom dem ble på $0,5 \text{ watt}$. Avviket ble imidlertid på 26% når effekten i

varmetråden var på 0 watt. Den lange stakken var best når effekten var lav, mens den korte stakken var bedre når effekten var høy. Grunnen til dette kan være at den lange stakken var i stand til å produsere en høyere temperaturdifferanse mens den korte stakken flyttet mer effekt. Lang stakk gir høyere differanse siden den akustiske kjølingen får virke over et lengre område. Baksiden med en lang stakk er at selv om det ble konkludert med liten demping i stakken dempet den lyden mer enn den korte stakken. Dette førte trolig til at transporten av effekt gjennom stakken ble mindre. Dette ble også observert under målingene av oppnådde temperaturdifferanser etter 1 og 2 minutter. Den korte stakken kom raskere opp til sin maksimale temperaturdifferanse mens den lange stakken oppnådde den største differansen.

Ved en gitt temperatur vil virkningsgraden være direkte avhengig av kjøleeffekten. Dette er fordi effekten som ble matet inn i kjøleren under testene var konstant ved alle lastene. Virkningsgraden er kun avhengig av effekten inn som er konstant og den oppnådde kjøleeffekten. Den vil derfor være proporsjonal med kjøleeffekten.

Kjølevannet som ble brukt i testene kan sees på som en feilkilde til den reelle virkningsgraden til systemet. Hvis målet på virkningsgraden skulle ha vært korrekt, burde det ha vært brukt vann med romtemperatur. Siden det ble brukt vann med en temperatur på ca 4 °C vil ikke effekten som sendes inn til drivelementet være den eneste effekten som forbrukes av systemet. Man kan se det som om at kjølevannet ble kjørt gjennom en forkjøler med et visst effektforbruk før det fikk sirkulere gjennom varmeveksleren. Dette vil bidra til å øke kjøleeffekten siden en lavere temperatur i varm side av stakken gjør det lettere for kjøleren å pumpe varme fra kald til varm side. Man kan også se at resultatene på målingen av virkningsgrad er usannsynlig gode. En virkningsgrad på over 30 % har aldri blitt oppnådd på noen termoakustisk kjøler. Disse resultatene ble derfor ikke tatt med under vurderingen av kjølerens ytelse.

Grunnen til at det ble brukt kaldt vann i varmeveksleren var at det ikke ble skaffet en vannpumpe som kunne sirkulere vann gjennom varmeveksleren fra et vannkar med romtemperatur. Man var dermed nødt til å bruke springvann som kjølemedium. Selv om bruken av springvann fører til at de målte virkningsgradene ikke blir helt riktige, gir målingene av effekt fortsatt et godt bilde av kjølerens evne til å flytte varme.

5.6 Systemet

Systemtestene ble foretatt for å visualisere hvordan systemet fungerte, samt demonstrere overgangene mellom de forskjellige enhetene. Figur 4.5.1 viser den første av testene. Man kan tydelig se effekten av varmetråden som varmer opp røret. På samme måte som i kapittel 4.4.7 om testingen av varmeoverføringskoeffisienten, er det viktig å merke seg at varmelekkasjen fra varmetråden til varmeveksleren uten lyd er liten. Dette er positivt og er med på å validere at den målte kjøleeffekten faktisk skyldes termoakustisk kjøling og ikke diffusjon gjennom luft.

Fra 60 til 70 minutter i Figur 4.5.1 er varmetrådene og lyden på, men ikke vannet. Temperaturdifferansen bygges raskt opp til ca 10 grader for så å avta igjen. Grunnen til dette er at man sender effekt inn i røret uten å hente noe ut. På denne måten blir det en opphopning av varme i røret og temperaturen i hele røret vil stige.

Etter 70 minutter når vannet og lyden ble skrudd på, ser man hvordan kjøleren gradvis flytter varmen bort fra varmetråden. Temperaturen i varmeveksleren synker hurtig til en stabil verdi, mens temperaturen i varmetråden bruker ca 3 ganger så lang tid på å stabilisere seg. Denne tregheten gjentar seg etter 120 minutter når lasten skrues av. En mulig årsak til dette kan være at veggene i kjøleren fungerer som en slags temperaturbuffer. Dette fører til at ved en stabil høy temperatur over tid, lagres varme i veggene. Når man så setter på kjølingen, vil temperaturen synke fort i begynnelsen når temperaturforskjellen mellom gassen i røret og veggen ikke er så stor. Når denne forskjellen begynner å vokse vil imidlertid veggen i større grad begynne å motvirke temperaturforandringen som skjer inne i røret. Dette vil bremse nedkjølingen slik man kan se i figuren. Den samme effekten oppstår når varmetråden settes på i begynnelsen av testen. Rørveggen fungerer også her som en temperaturbuffer og motvirker forandringer av temperaturen. Temperaturstigningen er rask til å begynne med, men den bruker lang tid før den stabiliserer seg.

I begge systemtestene kan man tydelig se resultatet når enten varmetråden eller vannet i varmeveksleren skrues på. Dette tyder på at begge disse elementene fungerte effektivt. Det ble også lagt spesielt mye arbeid ned i byggingen av disse siden spesielt varmevekslere har blitt omtalt som et problem i noen av artiklene om akustiske kjølere. Valget av kobber som materiale, den lave spalteavstanden og presisjonen under byggingen antas å være de viktigste grunnene til at varmeveksleren fungerte så bra som den gjorde.

6 Konklusjon

Kjøleren ble bygget for å muliggjøre måling av kjøleeffekt og virkningsgrad. Designet og konstruksjonen av kjøleren muliggjorde dette. Designet var også slik at kjøleren var modifiserbar underveis. Dette ble utnyttet ved å teste flere stakklengder og akustiske drivere.

Under planleggingen av kjøleren ble simuleringsprogrammet Comsol Multiphysics brukt. Her ble den optimale rørlengden for ønsket frekvens funnet til 98,3 cm. De senere testene viste at Comsol leverte resultater med meget små avvik fra de målte verdiene.

Resultatet av målingen av kjøleeffekt kan sies å være et valid og godt mål på effekten kjøleren kunne pumpe fra kald til varm side i stakken. Det ble målt en kjøleeffekt på ca 15 watt ved 20 grader. Dette ville ikke kunne brukes som noe kjøleskap for mat, men en mulig applikasjon kunne være kjøling av elektronikk der det ikke kreves like lave temperaturer.

Målet av virkningsgraden står i direkte sammenheng med effektmålingen. Her kom man frem til en virkningsgrad på opp mot 75 % noe som er usannsynlig høyt. Resultatet er imidlertid ikke valid på grunn av det kalde vannet som ble brukt i varmeveksleren.

Testingen av kjøleren har også vist at varmetråden og varmeveksleren fungerte bra. Designet av varmeveksleren må spesielt sies å ha vært bra da denne leverte meget god ytelse.

7 Videre arbeid

Arbeidet med kjøleren har blitt gjort grundig for å få et best mulig resultat. Det oppstod fortsatt ting som ikke var optimalt. For å forbedre ytelsen ytterligere kunne man ha gjort følgende utbedringer på den nåværende kjøleren.

For å finne årsaken til den uventede optimale stakkposisjonen kunne man målt volumhastigheten inne i røret. På denne måten kunne man kanskje ha funnet ut om volumhastigheten og trykket i den optimale stakkposisjonen var slik det ble antatt at de burde være. Et bilde av volumhastigheten gjennom lengden av røret kunne også bidratt til en større forståelse av hvordan stakk og varmeveksler påvirker lyden.

Man kunne skaffet en bedre stakk med trangere kanaler, mindre veggtykkelse og høyere perforeringsgrad slik at de viskøse tapene ble mindre. En stakk med trangere kanaler ville gjort det mulig å benytte en høyere frekvens og dermed et kortere rør. Ved en høyere frekvens ville det blitt lettere å generere høye lydtrykk.

I tillegg kunne det vært skaffet vannpumper slik at det hadde blitt mulig å måle en reell virkningsgrad ved å bruke vann med romtemperatur. Temperaturmåling på vannet inn og ut av varmeveksleren kunne også ha gitt et bedre bilde av hvor høy kjøleeffekt kjøleren hadde.

8 Bibliografi

- [1] Russel, Daniel A og Weibull, Pontus., *Tabletop thermoacoustic refrigerator for demonstrations*. s.l. : Sciens and Mathematics Department, Kettering Unviersity, 2001.
- [2] Rott, N., *Thermoacoustics*. s.l. : Adv. Appl. Mech, 1980.
- [3] Swift, G W., *Thermoacoustic engines*. Los Alamos : Condensed Matter and Thermal Physics Group, Los Alamos National Laboratory, 1988.
- [4] Herman, C og Wetzel, M., *Design optimalization og thermoacoustic refrigerators*. s.l. : Int. J. Refrig, 1997.
- [5] Kleiven, Stig., *Thermoacoustic refrigerators: Time-domain modelling and experimental setup*. Göteborg, Sweden : Chalmers University of Technology, 2008.
- [6] Seybert, Andrew F., *Notes on Absorption and Impedance Measurements*. s.l. : University of Kentucky.
- [7] Grøn, Øyvind., Store Norske Leksikon. [Internett] [Sisert: 30 Mai 2009.] <http://www.snl.no/varmeoverføringskoeffisient>.
- [8] Nettet, Frode., *Høyttalerbok*. 3. utgave. <http://www.mamut.net/dynabel/subdet280.htm>.
- [9] Liu, Jin, et al., "Separation of thermoviscous losses in Celcor ceramic." *Acoustical Society of America Journal*. 2006, Vol. 119, 2, pp. 857–862.
- [10] Garret, Steven L og Backhaus, Scott., "The Power of Sound." s.l. : American Scientist, 2000, Issue November-December.
- [11] Swift, Greg., Los Alamos National Laboratory. [Internett] [Sisert: 3 Juni 2009.] <http://www.lanl.gov/mst/engine/>.
- [12] University, Penn State., Penn State University. [Internett] [Sisert: 3 Juni 2009.] <http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/benandjerrys.htm>.
- [13] Ballister, S C og McKelvey, D J., *Shipboard electronics thermoacoustic cooler*. Monterey, CA : Naval Postgraduate School, 1988.
- [14] , Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. [Internett] [Sisert: 31 Mai 2009.] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/stefan.html>.
- [15] Garret, S L, Adeff, J A og Hofler, T J., *Thermoacoustic refrigerator for space applications*. s.l. : J. Thermopys, 1993.
- [16] Swift, G W., *Thermoacoustics A Unifying Perspective For Some Engines And Refrigerators*. New York : Acoustical Society of America, 2002. 0-7354-0065-2.

9 Vedlegg

9.1 Datablad, Dynabel PA 1250



Model:PA1250

Materials of construction

- Kapton coil former for increased rigidity and thermal protection
- Polyimide-imide coated two-layer copper-clad Aluminum voice coil for low mass and increased sensitivity
- Ferrite magnet
- Vented and extended core for increased power handling
- Die-cast aluminum basket for rigidity
- Paper cone
- Treated cloth edge
- Solid composition paper dust cap

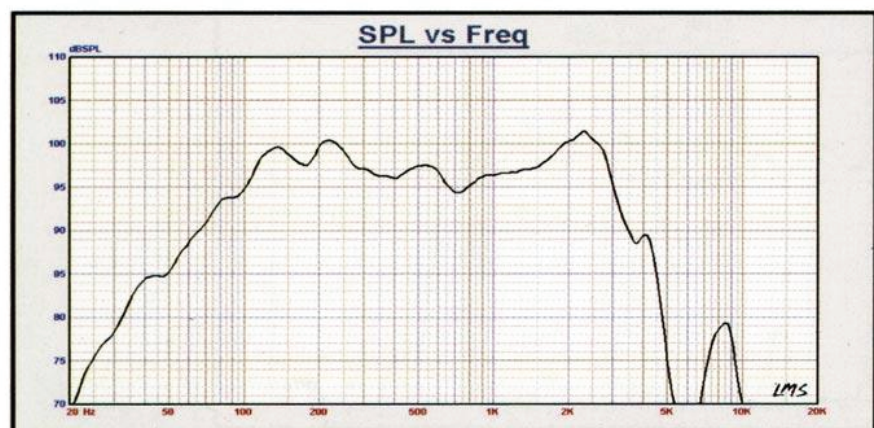
Nominal Basket Diameter	12 "
Impedance	8 Ω
Power Rating	500 WRMS
Resonance	45Hz
Sensitivity	99dB/W.M
Magnet Weight	90oz
Gap Height	9.5mm
Voice Coil Diameter	76MM
Usable Frequency Range	Fo-3kHz

Mounting information

Overall Diameter	314mm
Baffle Hole Diameter	283mm
Front Sealing Gasket	<i>fitted as standard</i>
Rear Sealing Gasket	<i>fitted as standard</i>
Mounting Holes Diameter	7mm
Mounting Hole B.C.D.	292mm
Depth	148mm
Weight	9.1kg

Thiele-Small parameters

Resonant Frequency	(Fs)	45Hz
Impedance	(Re)	5.5 Ω
Electromagnetic Q	(Qes)	0.32
Mechanical Q	(Qms)	11.7
Total Q	(Qts)	0.31
Compliance Equivalent Volume	(Vas)	85liters
Mechanical Compliance of Suspension	(Cms)	0.21mm/N
BL Product	(BL)	17.5T-M
Diaphragm Mass inc. Airload	(Mms)	57grams
Voice Coil Overhang	(Xmax)	+/- 3.25mm
Surface Area of Cone	(Sd)	529cm ²



9.2 Datablad, Seas SW300/1 12"



SW300/1 L0020

30 cm High End automotive subwoofer

The SW300/1 is a High End Car Audio Subwoofer with low distortion. This is the choice for those seeking a precise and realistic reproduction of the lowest frequency range in their cars.

Optimally shaped aluminum cone.

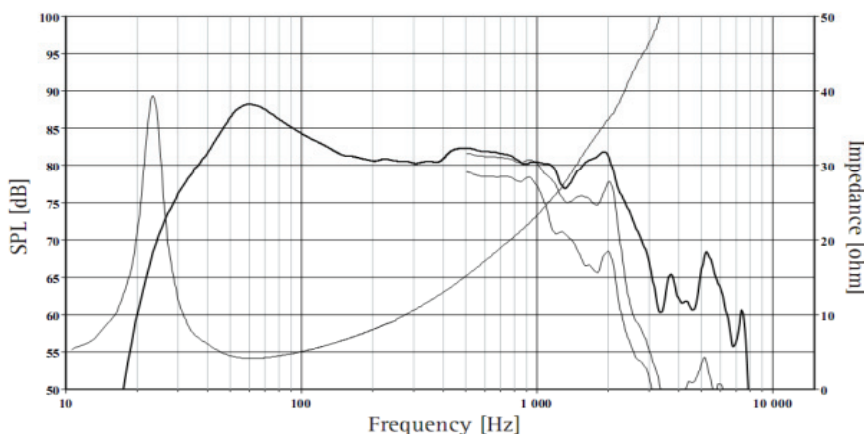
The lead out wires are integrated in the spider for long life and noise free performance at large excursions.

Wide natural rubber surround for optimum performance over a wide temperature range.

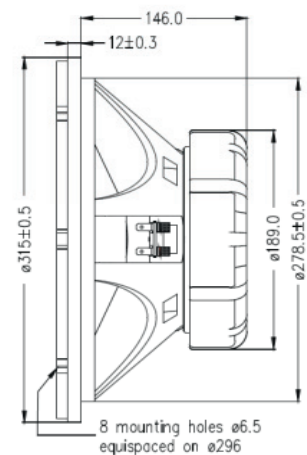
Stiff and stable injection moulded metal basket to keep the moving parts in perfect alignment under normal and extreme conditions.

Extremely high temperature voice coil with Kapton former.

Screw terminals ensure excellent long term contact with the speaker cables.



The frequency responses above show measured free field sound pressure in 0, 30, and 60 degrees angle using a 311 closed box. Input 2.83 Vrms, microphone distance 0.5m, normalized to SPL 1m. The dotted line is a calculated response in infinite baffle based on the parameters given for this specific driver. The impedance is measured in free air without baffle using a 2V sine signal.



Nominal Impedance	4 Ohms	Voice Coil Resistance	3.4 Ohms
Recommended Frequency Range	30 - 500 Hz	Voice Coil Inductance	5.82 mH
Short Term Power Handling *	500 W	Force Factor	12.1 N/A
Long Term Power Handling *	180 W	Free Air Resonance	23 Hz
Characteristic Sensitivity (2.83V, 1m)	92.0 dB	Moving Mass	158 g
Voice Coil Diameter	52 mm	Air Load Mass In IEC Baffle	6.1 g
Voice Coil Height	37 mm	Suspension Compliance	0.3 mm/N
Air Gap Height	10 mm	Suspension Mechanical Resistance	4.0 Ns/m
Linear Coil Travel (p-p)	27 mm	Effective Piston Area	480 cm ²
Maximum Coil Travel (p-p)	44 mm	VAS	94 Litres
Magnetic Gap Flux Density	0.66 T	QMS	5.92
Magnet Weight	5.80 kg	QES	0.56
Total Weight	7.1kg	QTS	0.51

Jul 2007-1

*IEC 268-5

SEAS reserves the right to change technical data

RoHS compliant product

www.seas.no