

Konstruksjon av ultralydbad

med tanke på akustisk kavitasjon

Tore Sandbakk

Master i elektronikk

Oppgåva levert: Juni 2010

Hovudrettleiar: Odd Kr. Pettersen, IET

Medrettleiar(ar): Tone Berg, SINTEF

Oppgåvetekst

I denne oppgåva skal studenten byggje eit kar med ein eller fleire transduserar for å lage eit ultralydbad. Studenten skal så undersøkje eigenskapane til dette ultralydbadet med tanke på lydtrykksnivå, frekvens og kavitering. Studenten skal også ta for seg litteratur rundt kavitasjon og sette denne litteraturen i samanheng med eigenskapane til ultralydbadet og korleis kavitering kan nyttast til å ta livet av/fjerne bakteriar i ultralydbadet. Dersom tida strekk til skal ein teste ut ultralydbadet på faktiske bakteriar ved St. Olavs Hospital.

Oppgåva gitt: 15. januar 2010
Hovudrettleiar: Odd Kr. Pettersen, IET

Tore Sandbakk

Hovudrettleiar: Odd Kr. Ø. Pettersen

Medrettleiar: Tone Berg

Konstruksjon av ultralydbad med tanke på akustisk kavitasjon

Masteroppgåve

for graden Master of Science in Technology, Electronics

Trondheim, juni 2010

Noregs Teknisk-naturvitskaplege Universitet

Fakultet for Informasjonsteknologi, Matematikk og Elektroteknikk

Institutt for Elektronikk og Telekommunikasjon

NTNU
Noregs Teknisk og Naturvitskapelege Universitet

Masteroppgåve
for graden Master of Science in Technology, Electronics

Fakultet for Informasjonsteknologi, Matematikk og Elektroteknikk
Institutt for Elektronikk og Telekommunikasjon

Framsidedeilete nytta med løyve frå Balázs Hajdu

©2010 Tore Sandbakk

Abstract

Today, biofilms adhered to prostheses implanted in the human body are the cause of infections and pain for the patient. Cavitation could prove to be a method to remove the biofilm. Previous medical studies using commercially available ultrasonic cleaners have not clarified whether acoustic cavitation occurs in the glass tubes needed to contain the prostheses. If cavitation could be a method, it would be faster and less expensive than the existing methods.

If the method of acoustic cavitation is to be used, it is essential that acoustic cavitation occurs inside the glass tubes. This is because the prostheses must be contained in sterile surroundings, such as a glass tube. This is examined in an ultrasonic tank designed to allow control of frequency and acoustic pressure. The characteristics of the ultrasonic tank are compared to theory on acoustic cavitation and a commercial ultrasonic cleaner to establish the best settings of an ultrasonic tank and to propose a suitable acoustic signal.

Preliminary measurements with several frequencies were done to establish an approximate transient cavitation threshold, allowing more thorough measurements. Experiments were done both with and without a glass tube to examine the differences. The pulse width of the acoustic signal was varied to examine the effect it had on the transient cavitation threshold. It was also varied to examine if decreasing the pulse width still could allow acoustic cavitation.

Acoustic cavitation was detected inside a glass tube with acoustic pressure above 176 kPa for pulse widths of 15 ms and a rate of repetition of 10 Hz. Acoustic cavitation was also possible to achieve for shorter pulse widths, however, this increased the transient cavitation threshold (up to 240 kPa).

The results revealed that acoustic cavitation can indeed occur inside a glass tube and thus this phenomenon could be used as a method of biofilm removal and further studies should be made.

Samandrag

I dag er biofilm på proteser operert inn i kroppen årsak til infeksjonar og pasient-smarter. Ein ynskjer å vite om kavitasjon kan nyttast til å fjerne denne biofilmen. Tidlegare medisinske studiar med kommersielt tilgjengelege ultralydbad har ikkje klargjort om kavitasjonsfenomenet eksisterer i dei kolbene protesene må være i. Dersom kavitasjon kan nyttast kan dette gje ein raskare og rimelegare metode for å fjerne biofilm enn det som eksisterar i dag.

For å vite om kavitasjon kan nyttast må ein vite om fenomenet oppstår i ein glaskolbe. Dette fordi protesene må ligge i sterile omgivadar som ein slik kolbe er. Dette undersøkjast i eit konstruert ultralydbad der ein har kontroll på det akustiske lydtrykket og frekvensen. Eigenskapane til ultralydbadet samanliknast med kavitasjonsteori og eit kommersielt ultralydbad for å finne best mogleg oppsett av ultralydbadet og for å fastsetje eit eigna akustisk signal.

Generelle førebuande målingar med fleire frekvensar blei gjort for å finne omtrentleg kavitasjonsterskel for så å kunne fortsette med fleire grundigare forsøk. Målingar blei gjennomført både med og utan glaskolbe for å sjå på skilnadane dette gav. Pulsbreidda til det akustiske signalet blei variert for å sjå effekten dette hadde på kavitasjonsterskel og for å sjå kor korte pulsar ein kan nytte og framleis få i gang kavitasjonsfenomenet. Dette for å kunne ha så lite kavitering som mogleg.

Kavitasjon viste seg å vere mogleg inne i ein glaskolbe med akustisk trykk over 176 kPa for pulsar på 15 ms og ein repetisjonsrate på 10 Hz. Kavitasjon var også mogleg å få til for endå kortare pulsar med same repetisjonsrate, då med ein auka kavitasjonsterskel (opptil 240 kPa).

Sidan resultata viser at vatnet kaviterer inne i ein glaskolbe er det grunn til å tru at dette fenomenet kan nyttast til å fjerne biofilm og at ein difor bør fortsette studiar på dette området.

Forord

Mykje tid og energi har gått med til å gjennomføre arbeidet med denne masteroppgåva og eg vil her rette merksemda til dei som har gitt hjelp og støtte undervegs.

For fagleg rettleiing og hjelp med eigna litteratur vil eg takke mine to rettleiarar Odd Kr. Ø. Pettersen og Tone Berg ved Sintef IKT Akustikk. Dei har gitt dei vink og råd som har vore nødvendige for å få oppgåva trygt i hamn.

For hjelp med det tekniske utstyret nytta i oppgåva har Øyvind Lervik og Tim Cato Netland, som heile vegen har vore svært hjelpsamer når eg har ynskt utstyr til arbeidet mitt, vore til stor hjelp. Ikkje noko ynskje har vore for lite eller for stort.

Eg ynskjer også å takke Kristoffer og Per for felleskap og gode kaffipausar gjennom arbeidet. Det hadde blitt traudige dagar utan dette.

Tusen takk til mor, far og resten av familien min for støtte og stønad gjennom livet og skulegangen min og mest av alt takk til Marianne som har vore ved mi side og gjeve meg uvurderleg støtte og kjærleik gjennom den lange prosessen med oppgåva.

Takk.

Tore Sandbakk
25. juni 2010

Innhald

1	Innleiing	1
2	Teori	3
2.1	Definisjonar og symbol	3
2.2	Undervassakustikk	4
2.3	Transmisjon gjennom ein tynn vegg	5
2.4	Kavitasjon	7
2.5	Akustisk Kavitasjon	8
2.5.1	Bobleradius	9
2.5.2	Kavitasjonsterskel	9
2.6	Transduser og hydrofon	16
2.7	Medisinsk bruk av ultralyd	17
2.7.1	Biofilm	18
3	Metode	21
3.1	Utstyr	21
3.1.1	Avgrensingar ved utstyret	22
3.2	Framgangsmåte	22
3.2.1	Kommersielt ultralydbad	24
3.3	Måleteknikk	25
4	Resultat	29
5	Drøfting	39
5.1	Analyse av oppsett	39
5.2	Analyse av resultat	40
5.3	Problem undervegs med utstyr	42

6 Konklusjon	43
6.1 Vidare arbeid	44
A Tabellar	47
B Matlabkode	61
B.1 Transmisjonstap	61
B.2 Resonans i luftbobler	62
B.3 Teoretisk kavitasjonsterskel	62

Figurar

2.1	Transmisjon gjennom barriere	5
2.2	Transmisjonstap for ulike frekvensar	6
2.3	Resonansfrekvens for ulike bobleradiar	10
2.4	Subharmonisk signal	11
2.5	Bilete av kavitasjon	12
2.6	Signalstyrke til $f/2$ frå ei boble på ein hydrofon	13
2.7	Frekvensspekter for sterkt kaviterande vatn	14
2.8	Teoretisk kavitasjonsterskel	15
2.9	Eksempel på transduser	17
2.10	Dei fem fasane i biofilmdanning	18
3.1	Signalkjede i måleoppsett	23
3.2	Oppsett av ultralydbad	24
3.3	Pulsbreidde	25
4.1	Bilete av kavitasjon	30
4.2	Lydtrykksnivå som funksjon av transdusereffekt for 32 og 50 kHz	31
4.3	Lydtrykksnivå i kommersielt ultralydbad	32
4.4	Lydtrykksnivå som funksjon av transdusereffekt for 32 kHz	33
4.5	Lydtrykksnivå som funksjon av transdusereffekt for 32 kHz	34
4.6	Frekvensspekter under kavitasjonsterskelen	35
4.7	Frekvensspekter ved kavitasjonsterskelen	36
4.8	Frekvensspekter godt over kavitasjonsterskelen	36
4.9	Kvotient av grunnfrekvens og harmonisk innhald	37
4.10	Kavitasjonsterskel som funksjon av pulsbreidde	37

It is tempting to view the moments during cavity collapse as analogous to those during the astrophysical 'Big Bang' (...).

Professor Wesley Nyborg [1, forord]

Kapittel 1

Innleiing

Ultralydbad har dei seinare åra blitt meir og meir vanlege innan industrien. Eit ultralydbad er eit rimeleg og relativt enkelt apparat som let brukaren reingjere gjenstandar som kanskje elles ville vere vanskelege å reingjere på grunn av ei vanskeleg overflate eller fordi det er delikate små delar som skal reingjerast, til dømes innan urmakaryrket eller hjå ein gullsmed.

I denne oppgåva er eit ultralydbad definert som ein tank for vatn med ein transduser i som kan sende ut kraftig nok signal til å setje i gang fenomenet akustisk kavitasjon. Dette fenomenet blir grundig introdusert i kapittel 2, der ein også ser nærare på ultralyd og transduserar, men ein kort introduksjon følgjer.

Det er store krefter som er involvert i eit ultralydbad då det er fenomenet kavitasjon som er avgjerande for kor vidt eit ultralydbad fungerer eller ikkje. Fenomenet går kort fortalt ut på at dersom ei akustisk påtrykt kraft er stor nok kan ei gassboble i ei væske ekspandere og kontrahere. Med stor nok kraft kan kontraksjonen vere så kraftig at bobla imploderer med voldsom styrke [1]. For å setje fenomenet i perspektiv kan vi sjå til naturen der kavitasjon dukkar opp i uventa samanhenger.

Ei pistolreke er ei lita reke som har ei klo som er mykje større enn den andre. Denne kloa nyttar ho til forsvar og til jakt, men ikkje slik ein er van med at krabber

nyttar kloa si. Den knipsar kloa så raskt saman at vatnet rundt kloa kaviterer og dersom det er små dyr i nærleiken, så vil dei anten svime av eller døy av den store trykkendinga [2].

Det er grunna desse store kreftene at det no er interesse for å ta i bruk kavitasjon innan medisin. Det har allereie blitt gjort medisinske forsøk der ein har teke i bruk eit kommersielt tilgjengeleg ultralydbad for å undersøkje effekten det har på bakteriar. Det er då særleg i samband med proteser operert inn i kroppen vår ein ynskjer at kavitasjon kan ha ein reingjerande effekt med tanke på bakteriar. Årleg er det i USA åleine fleire enn 650 000 pasientar som får protesar operert inn i kroppen sin, men det er diverre ikkje utan komplikasjonar [3].

Proteser som til dømes hoftekuler har ein risiko for å bli utsett for bakterieangrep sidan kroppen sjølv ikkje er i stand til forsvare eit slikt framandlegeme [4]. Bakteriane kan då lett feste seg på protesene og etter kvart utvikle seg til biofilm, ein svært resistent form for bakteriekoloni [5] og dette fører igjen til infeksjonar som kan vere svært smertefullt for pasienten [4]. Sidan det i dag ikkje eksisterar ein lett, billeg måte å fjerne biofilmen på og medisinsk behandling ikkje har så stor effekt på biofilm ynskjer ein å undersøkje om ultralyd og kavitasjon kan vere ein slik metode [3, 4]. Protesene må då først bli operert ut av kroppen før ein kan leggje dei i ein glaskolbe i eit ultralydbad der kavitasjonen kan fjerne biofilmen.

Denne oppgåva skal sjå nærare på fenomenet kavitasjon og korleis dette kan hjelpe med fjerning av biofilm og samstundes skal det forsøkjast å føreslå lågast mogleg akustisk trykk som skal til for å få i stand kavitasjon. Dette fordi ein ynskjer ikkje å drepe biofilmen, ein ynskjer berre å få den laus frå protesen for å kunne studere kva slags bakterier som har danna biofilmen [3]. Arbeidet i masteroppgåva er eit framhald av arbeidet som blei gjort i eit prosjekt hausten 2009 og mindre delar av oppgåva, særleg teori om biofilm, er henta frå denne prosjektoppgåva.

Kapittel 2

Teori

Teorien vil i hovudsak fokusere på fenomenet kavitasjon då det er dette fenomenet som truleg kan vere med på å løsne biofilm frå proteser. I tillegg vil det vere noko teori om transmisjon frå eit medium til eit anna og litt teori om korleis biofilm oppfører seg. Frekvensområdet som er mest aktuelt er 16 – 100 kHz, noko vi vil sjå seinare av målingane gjort i denne oppgåva. Difor vil teorien ta føre seg korleis lydbølgjene oppfører seg i dette området. I tillegg må proteser som skal reinsast for biofilm ligge i ei steril løysing og kan såleis ikkje kome i kontakt med vatnet i sjølve ultralydbadet, difor blir det også nødvendig å sjå på transmisjon gjennom eit medium. Mediumet det er snakk om er glas noko som er hensiktsmessig i høve til praksis for studering av biofilm på proteser [3].

2.1 Definisjonar og symbol

Nokre omgrep nytta i denne oppgåva bør bli presentert før dei kjem i bruk slik at dei er klare og tydelege for lesaren. Mange frekvensspekter kjem til å bli presentert og diskutert og desse omgrepa vil eg nytte til å skildre frekvenstoppane som er synlege.

- f - grunnfrekvens. Ofte er dette den lågaste frekvenstoppen i eit frekvensspekter, men i denne oppgåva vil det alltid bety frekvensen sendt ut frå signalgeneratoren.
- $f/2$ - 1. subharmonisk. Halvparten av grunnfrekvensen. Vidare får vi då $f/3$ som 2. subharmonisk osv.
- $3f/2$ - 1. ultraharmonisk. 1,5 gangar grunnfrekvensen. $5f/2$ blir då 2. ultraharmonisk og er 2,5 gangar grunnfrekvensen.
- $2f$ - 1. harmonisk, $3f$ 2. harmonisk osv.
- Harmonisk innhald - med dette meinast det innhald av subharmoniske og ultraharmoniske frekvensar i eit frekvensspekter. *Ikkje* harmoniske frekvensar.

Elles vil variablar som er oppgitt i desibel vere skrivne med stor bokstav medan variablane gitt med fysiske einingar vil ha liten bokstav. Til dømes vil lydtrykk vere oppgitt som p (Pa) og tilsvarande lydtrykksnivå vil då bli P (dB).

2.2 Undervassakustikk

Det er viktige forskjelar mellom korleis lyd breiar seg i vatn i høve til korleis den breiar seg i luft. For det første er lydfarten større i vatn enn i luft. Vi har at $c_{vatn} = 1480$ m/s medan farten i luft er $c_{luft} = 344$ m/s [6]. I tillegg har vi ein større tettleik i vatn enn i luft og dette gjev samla ein akustisk impedans i vatn som er mykje høgare enn i luft. Dette vil seie at det trengs ei mykje større kraft for setje i gang rørsler i mediumet. Den akustiske impedansen er gitt som:

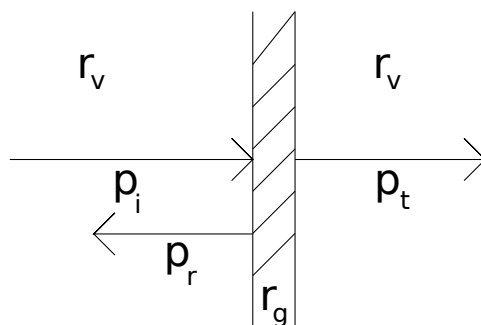
$$r = \rho c , \quad (2.1)$$

der ρ er tettleiken og c er farten til lyden [7]. For vatn blir den $r_v \approx 1.5 \cdot 10^6$ kg/m², men den kan endre seg ein del dersom det er stor konsentrasjon av luftbobler i vatnet

[1]. Sidan lyd oppfører seg annleis i vatn har heller ikkje det vanlege referansetrykket $p = 20 \mu\text{Pa}$ så mykje meining under vatn. Difor har ein bestemt at for lydtrykk under vatn skal referansetrykket vere $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ [8] og alle desibelverdiar i denne oppgåva nyttar denne verdien som referanse.

2.3 Transmisjon gjennom ein tynn vegg

Dersom lyd skal igjennom ein barriere må ein rekne med at ein har eit tap av energi som gjev eit lågare lydtrykk på den andre sida av barrieren. I tillegg må bølgjelengda vere stor i høve til kor tjukk barrieren er dersom lyden i det heile skal gå igjennom. Bølgjelengda for frekvensområdet vi skal operere med i denne oppgåva (16 – 100 kHz) er gitt som $\lambda = \frac{c}{f}$, noko som gjev bølgjelengdene 14,8 – 92,5 mm. Desse bølgjelengdene er mykje større enn tjukkelsen på veggane i glaskolben nytta i forsøkja som er ca. 1 mm. Det vil seie at lyden frå transduseren vil ikkje ha noko problem med å trengje gjennom veggane til glaskolben, men det vil vere eit tap av energi gjennom veggane som blir kalla transmisjonstapet. Figur 2.1 viser korleis lyden då vil gå.



Figur 2.1: Figuren viser transmisjon gjennom ein barriere. Her er r_v og r_g den akustiske impedansen til vatn og glas. p_i er lydtrykket inn mot barrieren, p_r er det reflekterte lydtrykket og p_t er lydtrykket på andre sida av barrieren.

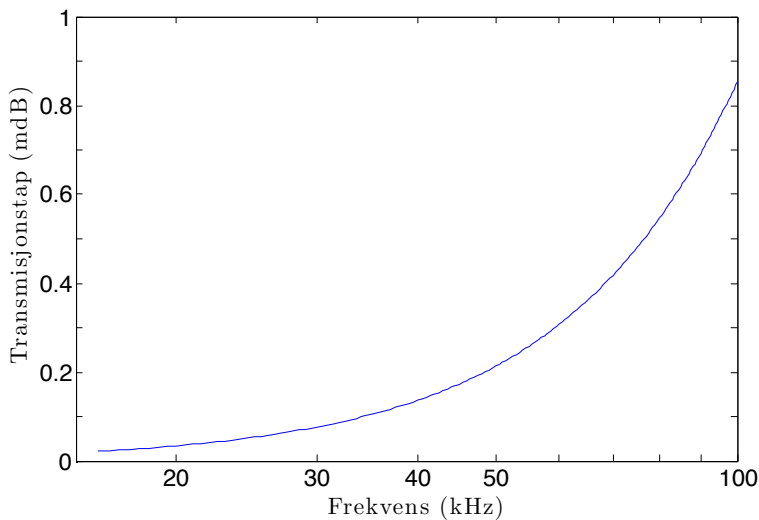
Frå [9] har vi at transmisjonskoeffisienten T_I er gitt ved likning (2.2). Likninga går ut i frå at den akustiske impedansen til barrieren, r_g er mykje større enn den akustiske impedansen til vatnet, r_v , noko som stemmer [10, 11].

$$T_I = \frac{p_i}{p_t} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} (r_g/r_v)^2 \sin^2 k_g L}, \quad (2.2)$$

der $k_g = 2\pi f/c_g$ er bølgetallet i glas og L er breidda på barrieren. Transmisjonstapet er då gitt ved (2.3) noko som er eit resultat av masselova [6].

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{T_I} \right) \quad (2.3)$$

Transmisjonstapet er plotta i figur 2.2 og vi kan sjå at tapet er under 0,001 dB, noko som er så lite at det er neglisjerbart.



Figur 2.2: Figuren viser transmisjonstapet gjennom ein tynn glasvegg ($L = 1$ mm) i vatn for frekvensane 16 – 100 kHz. Matlab blei nytta for å få fram grafen og koda for dette er gitt i vedlegg B.1.

2.4 Kavitasjon

Kavitasjon er definert som danninga av og aktiviteten til bobler i ei væske. Boblene er då anten midt i væska eller i grenseflata til andre objekt i eller ved væska. Hydrodynamisk kavitasjon blei første gang skildra i 1895 av Barnaby og Thornycroft som studerte luftboblene som blir danna på propellar under vatn. Dei fann ut at det negative trykket måtte vere større enn 6,75 psi eller omlag 47 kPa for at desse boblene skulle oppstå på propellen. [1, s. 3]

I dag veit vi at det fins fire forskjellige forhold som fører til ein auke i storleiken til ei boble [1, s. 4].

- Gasskavitasjon - det oppstår ein trykkreduksjon eller ein temperaturauke i ei gassboble i væska.
- Dampkavitasjon - vi får ein trykkreduksjon i ei dampboble i væska.
- Diffusjon - Ei allereie eksisterande boble blir fylt med (meir) damp frå væska ved diffusjon.
- Koking - ved høg temperatur blir væska omgjort til damp i bobler.

Her er gass meint som gass frå eit anna stoff enn væska medan damp er gass av same stoff som væska. Dei fire situasjonane kan oppstå på fleire måtar og dei fire metodar vi kjenner til som kan få ei væske til å kavitere:

- Hydrodynamisk kavitasjon - kavitasjon oppstår i ei væske som er i rørsle på ein slik måte at det oppstår trykkvariasjonar i væska.
- Akustisk kavitasjon - lydbølgjer som går gjennom væska er årsak til trykkvariasjonar.
- Optisk kavitasjon - høgintensitets lys (foton) kan gi kavitasjon.

- Partikkelkavitasjon - partiklar med høg fart, t.d. proton, kan gi kavitasjon.

For vår del er det akustisk kavitasjon som er den aktuelle metoden.

2.5 Akustisk Kavitasjon

Ved akustisk kavitasjon varierer ein det statiske trykket i ei væske slik at kavitasjon oppstår på ein av to måtar. Stabil eller forbigåande kavitasjon. Bobler i stabil kavitasjon endrar storleiken sin om ein likevekt over fleire periodar medan bobler i forbigåande kavitasjon varar i mindre enn ein periode. Bobla doblar då minst storleiken sin i løpet av den negative halvdel av perioden til det akustiske trykket, ein har då undertrykk i væska, for så å kollapse sterkt i neste halvdel av perioden, i overtrykket. Boblene inneheld oftast ei blanding av luft og damp frå væska i begge høve. Dei akustiske eigenskapane til væska blir endra når den byrjar å kavitere. Mellom anna kan ein ikkje lenger rekne med ein fast akustisk impedans.

Effekten av ein sterk boblekollaps kan berre observerast i ein avstand som er mindre enn berre nokre få radiar av boblestorleiken, men effekten er ganske dramatisk. Kortvarig vil ein få eit svært høgt trykk og svært høg temperatur i området rundt bobla og dette kan føre til dramatiske effektar på omgivnaden [1, s. 6].

Det er i tre situasjonar akustisk kavitasjon kan oppstå.

- Lydbølgjene påverkar ei gassboble i væska som flyt rundt åleine.
- Ein partikkel i væska som ikkje er gjennomvåt kan ha noko gass på overflata som lydbølgjene påverkar.
- Ei overflate i oppbevaringsmediumet for væska kan ha mikroskopiske sprekker der det er fanga ei gassboble som lydbølgjene kan påverke.

For at kavitasjonen i det heile kan starte er det viktig at lydtrykket er over eit visst nivå. Dette nivået blir kalla kavitasjonsterskelen. Det er tre parametarar som er viktige for akustisk kavitasjon. Det akustiske trykket som blir sendt inn i væska, det

hydrostatiske trykket i væska og radiusen til boblene i væska [12]. Det hydrostatiske trykket er tilnærma konstant nær vassoverflata, medan dei to andre parametrene varierer og dei skal vi sjå litt nærare på.

2.5.1 Bobleradius

Radiusen til ei boble bestemmer kva resonansfrekvensen til bobla er. Denne frekvensen er gitt ved (2.4) utleia av Minnaert i 1933 [1, s. 49].

$$\rho\omega_r^2 R_r^2 = 3\gamma P_0, \quad (2.4)$$

der ρ er tettheten til væska, γ er ein adiabatisk konstant og P_0 er det hydrostatiske trykket. Snur vi på likninga og sett inn $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 1,4$ og $P_0 = 10^5 \text{ N/m}^2$ får vi:

$$\omega_r R_r = \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}} \quad (2.5)$$

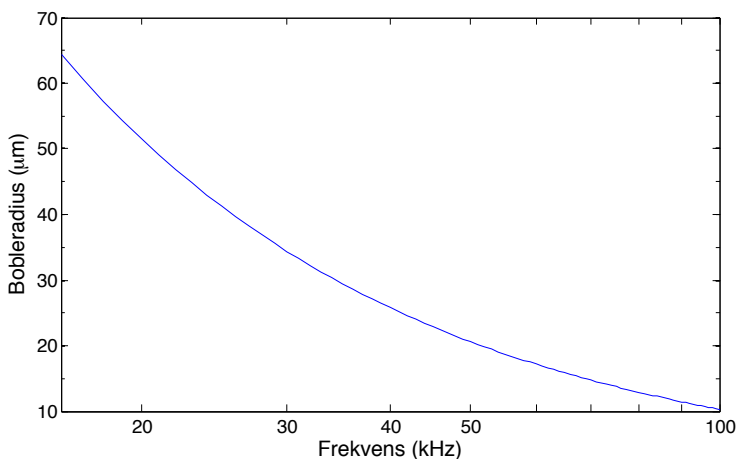
$$2\pi f_r R_r \approx 20,63 \quad (2.6)$$

$$R_r \approx \frac{3,28}{f_r} \quad (2.7)$$

Dette er plotta i figur 2.3 for det aktuelle frekvensområdet.

2.5.2 Kavitasjonsterskel

Neppiras [12] har skrive ein god artikkel om kavitasjonsterskel for akustisk kavitasjon. I denne artikkelen foreslår han relativt enkle likningar som er meir enn nøyaktige nok til bruk i industrielle og medisinske apparat. Han skriv at det er



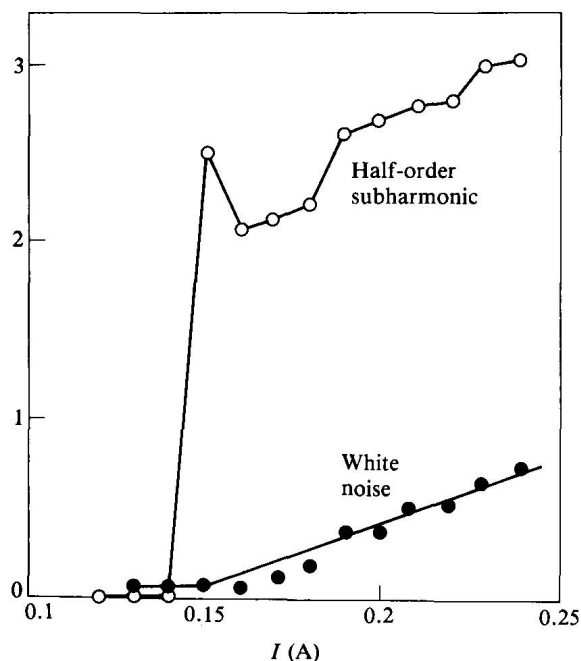
Figur 2.3: Figuren viser kva som er resonansfrekvensen for ein gitt bobleradius. Matlab blei nytta for å få fram grafen og koda for dette er gitt i vedlegg B.2.

viktig å merke seg at det er to tersklar som gjeld for kavitasjon. Ein nedre terskel som ein må over for å setje i gang kavitasjon med boblekollaps og ein øvre terskel der kavitasjonen sjeldan gir boblekollaps, men boblene har ein stabil tilstand og berre aukar og minkar radiusen. Vi skal sjå på den nedre kavitasjonsterskelen som frå nå av vil bli omtalt som kavitasjonsterskelen.

Vidare skriv Neppiras at når det akustiske trykket p_A blir større enn kavitasjonsterskelen p_T vil boblene i væska sende ut eit sterkt signal ved $f/2$ der f er den drivande frekvensen av transduseren. Dette kan vi sjå av figur 2.4 der ein med ein hydrofon har målt nivået på $f/2$. Nivået aukar drastisk ved kavitasjonsterskelen. I tillegg ser vi at vi får ein auke i nivået på breibanda kvit støy over kavitasjonsterskelen.

Akustisk observering av kavitasjon

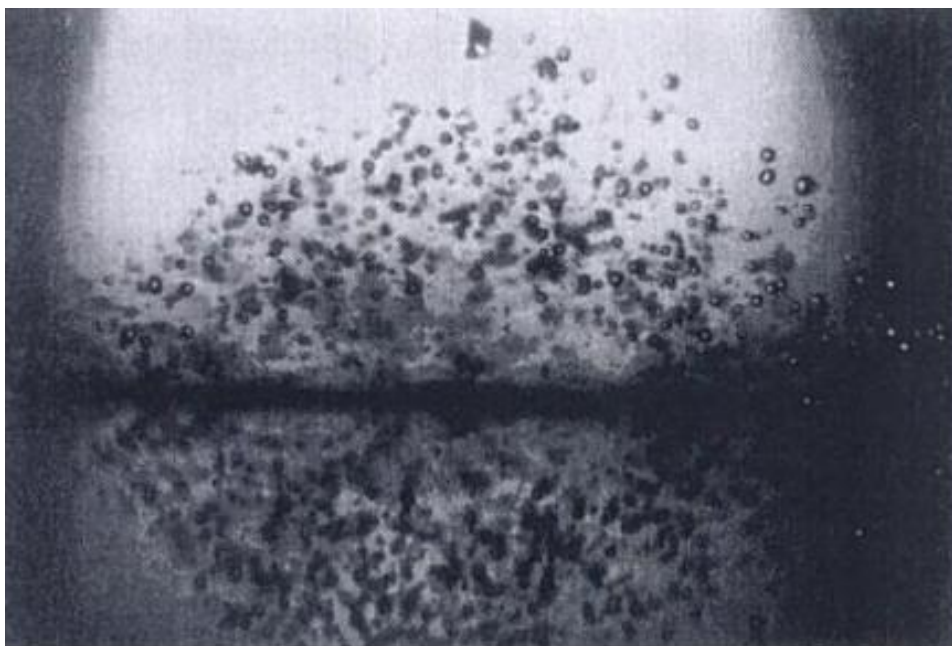
Store bobler er lett å observere med det nakne auget så lenge kavitasjonen er kraftig, som vist i biletet i figur 2.5, men ved kavitasjonsterskelen er det ikkje så lett å observere kavitasjonen utan andre hjelpemiddel. Ein er då nøydd til å måle



Figur 2.4: Signalstyrken til 1. subharmoniske $f/2$ i vatn med mykje luft som funksjon av straumen gitt til transduseren. $f = 28$ kHz. Figuren er henta frå [13] som ikkje gjev eining for y-aksen.

kavitasjonen indirekte anten ved hjelp av optikk, akustiske målingar eller kjemiske målingar [1]. Dersom ein nyttar ein optisk metode for å observere kavitasjon har ein i mykje større grad sjansen til å observere kavitasjonen nøyaktig, men slikt utstyr er dyrt og ikkje på langt nær like enkelt å setje opp som eit akustisk eksperiment.

Ved hjelp av ein hydrofon kan ein observere amplituden til 1. subharmonisk av den drivande frekvensen til ein transduser [12]. Til dømes vil det for ein drivande frekvens på 50 kHz oppstå ein subharmonisk frekvens på 25 kHz over kavitasjonsterskelen som er svært tydeleg i eit frekvensspekter. Det vil også bli generert ultraharmoniske frekvensar som også er godt synlege på eit frekvensspekter. Dermed er eit godt akustisk verkty for å finne nedre kavitasjonsterskel å studere subharmonisk av den drivande frekvensen, $f/2$, og i tillegg $3f/2$, 1. ultraharmonisk [13]. Som ein dobbelsjekk på at det akustiske trykket er over kavitasjonsterskelen kan ein også observere ein breibanda kvit støy i frekvensspekteret over kavitasjonsterskelen [1,

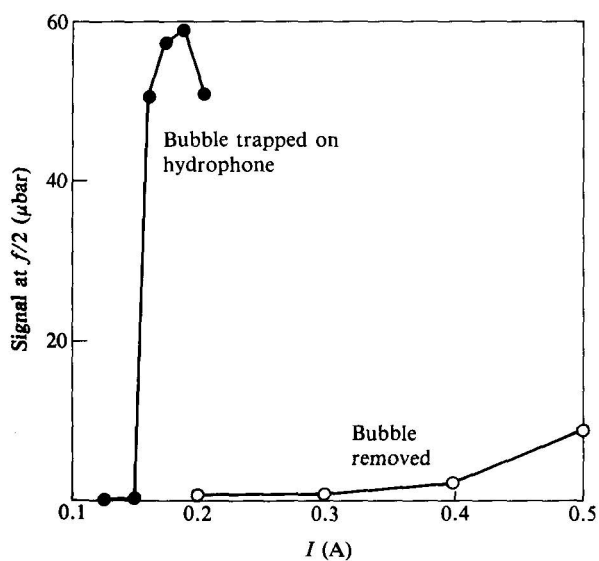


Figur 2.5: Over kavitasjonsterskelen er det mogleg å observere kavitasjon med det nakne auget. Biletet viser bobler som er synlege i vatn når eit akustisk lydtrykk er påført [14].

s. 121].

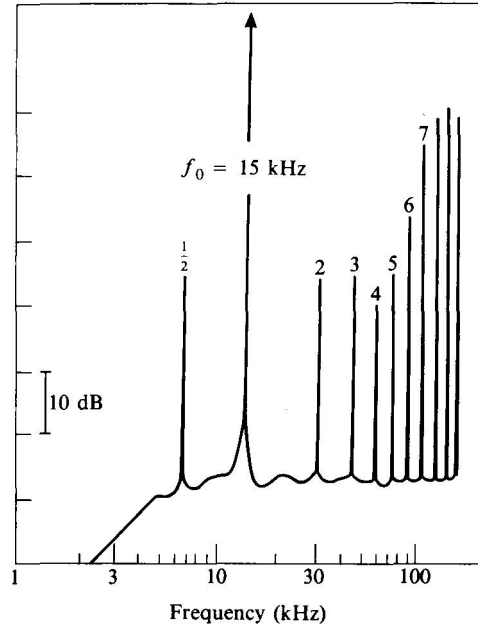
Sjølv om observasjonen av ein rask auke i signalstyrken til 1. subharmonisk og 1. ultraharmonisk er ein god indikator på at ein har nådd kavitasjonsterskelen er det viktig å samstundes sjekke om det akustiske trykket har nådd eit nivå der det er truleg at kavitasjon kan finne stad. Kjem denne raske auken ved alt for lågt akustisk trykk er det nemlig grunn til mistanke. Ei lita boble med rett storleik kan resonere ved $f/2$ godt under kavitasjonsterskelen og dersom den sit på hydrofonen vil den sende ut eit signal som er stort nok til at den fangar det opp. Eit eksempel på ei slik måling med og utan boble på hydrofonen er vist i figur 2.6. Ein slik auke av 1. subharmonisk er altså ein falsk indikator på kavitasjonsterskelen og ein bør difor studere måleresultat med argusauge for å vere sikker på kva auken er eit teikn på.

Som nemnt tidlegare får ein ein auke av harmonisk innhald og kvit støy over ka-



Figur 2.6: Figuren viser to ulike målinger der det i eine målinga er ei boble som har sett seg på hydrofonen og i andre målinga er bobla fjerna. Målingane viser signalstyrken til 1. subharmonisk ($f/2$) som funksjon av straumen sendt til transduseren. Når bobla sit på hydrofonen ser vi ein falsk indikator på kavitasjonsterskelen. Her er $f = 38$ kHz og målinga er gjort i 90% glycerolvatn. [13]

vitasjonsterskelen. Dersom ein følgjer med på eit frekvensspekter medan ein aukar det akustiske trykket er det då ikkje så altfor vanskeleg å sjå kva tid ein når kavitatsjonsterskelen. Eksempel på frekvensspekter frå arbeidet med denne oppgåva er å finne i kapittel 4 og eit eksempel på eit slikt frekvensspekter frå litteraturen er gitt i figur 2.7.



Figur 2.7: Frekvensspekter for ei sterkt kaviterande væske med $f = 15 \text{ kHz}$. Her er det tydeleg at ein har fått harmonisk innhald for $f/2$ og mange overharmoniske. Det er også tydeleg å sjå den kvite støyen over 4 – 5 kHz [13].

Teoretisk kavitatsjonsterskel

Neppiras [13] gjev ei forenkla likning på den teoretiske kavitatsjonsterskelen og den er gitt som:

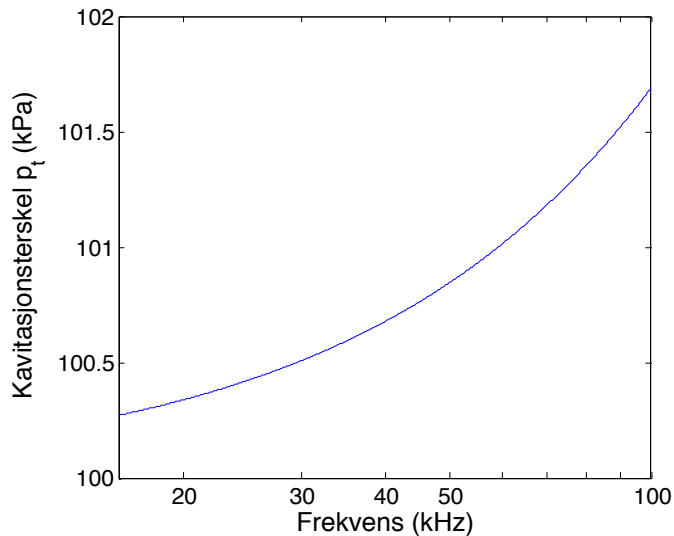
$$p_t = p_0 + \frac{4\sigma}{3(3/2)R_r}, \quad (2.8)$$

der σ er overflatespenninga til bobla og R_r er bobleradiusen til ei resonerande boble. Sett vi inn frå (2.7) for R_r , $\sigma = 0,072 \text{ N/m}$ og det hydrostatiske trykket $p \approx 10^5 \text{ Pa}$ [1] så får vi:

$$p_t \approx p_0 + \frac{4 \cdot 0,072 f_r}{3(3/2) \cdot 3,28} \quad (2.9)$$

$$p_t \approx 10^5 + 16,9 \cdot 10^{-3} f_r \quad (2.10)$$

p_t er plotta for 16 – 100 kHz i figur 2.8.



Figur 2.8: *Figuren viser den teoretiske kavitasjonsterskelen for frekvensområdet 16 – 100 kHz. Matlab blei nytta for å få fram grafen og koda for dette er gitt i vedlegg B.3*

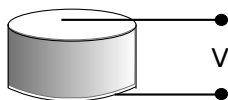
Kavitasjonsterskel som funksjon av pulsbreidde

Dersom det akustiske lydfeltet ikkje er konstant på, men er i staden på i korte pulsar og så slått heilt av som vist i figur 3.3 på side 25, så vil dette ha ein effekt på kavitasjonsterskelen [15]. Men denne effekten er enno ikkje studert fullt ut og gode data eksisterar ikkje for denne effekten i ulike væsker og for ulike frekvensar. Med tanke på at ein ynskjer å vere så nær som mogleg over kavitasjonsterskelen og ha så låg akustisk effekt som mogleg, jamfør delkapittel 2.7.1 om biofilm, er det interessant å sjå på korte pulsbreidder. Ei studie som viser samanhengen mellom kavitasjon og pulsbreidder er gitt i [15] der dei har studert effekten i tereftalsyre, ei væske med større tettleik enn vatn, og studien kan vise at for svært korte pulsar (< 1 ms) kaviterer ikkje syre i like stor grad. Ved aukande pulsbreidde aukar kaviteringa heilt til pulsbreidda er over 10 ms der det jamnar seg ut og syra kaviterer i omlag like stor grad for alle pulsbreiddene.

2.6 Transduser og hydrofon

Ein metode for å generere lydbølgjer under vatn er å nytte ein transduser. Namnet tyder berre at det er ein omformar av energi, men i akustikk er det nytta generelt om omforming av elektrisk spenning til lydbølgjer. For undervassakustikk er det då oftast ein piezoelektrisk transduser som blir nytta fordi dei er godt eigna til å bli drivne på mange ulike frekvensar og i tillegg kan dei både sende og ta i mot signal. Når ein set spenning på det piezoelektriske materialet blir det mekanisk deforma som ein funksjon av den variable spenninga [16]. Deforminga er i form av ekspansjon og kontraksjon og har same frekvens som spenninga. Det er slik transduseren kan verke begge vegar. Dersom eit lydtrykk i vatnet er stort nok til å deforme transduseren, så vil den generere eit elektrisk signal slik at transduseren verkar som ein mikrofon. Hydrofonar er eit spesialtilfelle av ein transduser som er konstruert spesielt med det formål å kunne ta i mot lyd. Den enklaste måten å lage ein transduser er vist i figur 2.9 der eit keramisk, sylindrisk materiale er tilkobla til ei spenning. For å få større effekt eller direktivitet kan ein kople fleire slike element i serie eller parallellt.

For kommersielt tilgjengelege transduserar er effektiviteten til transduseren gitt som Transmit Voltage Response (TVR). Dette målet på effektivitet er oppført som



Figur 2.9: Eit eksempel på ein svært enkel transduser.

eit desibel nivå i høve til $1 \mu\text{Pa}/\text{V}$ ved ein avstand på 1 m [17]. Ved ei gitt spenning v_{in} kan vi då forvente eit visst trykk p_{tr} ved 1 m gitt av (2.13).

$$TVR = \frac{20 \log \frac{p_{tr}}{p_0}}{v_{in}} \quad (2.11)$$

$$v_{in} 10^{TVR/20} = \frac{p_{tr}}{p_0} \quad (2.12)$$

$$p_{tr} = v_{in} p_0 10^{TVR/20} \quad (2.13)$$

Sett vi inn $v_{in} = 1 \text{ V}$ får vi:

$$p_{tr} = p_0 10^{TVR/20} \quad (2.14)$$

som er TVR oppgitt i Pascal.

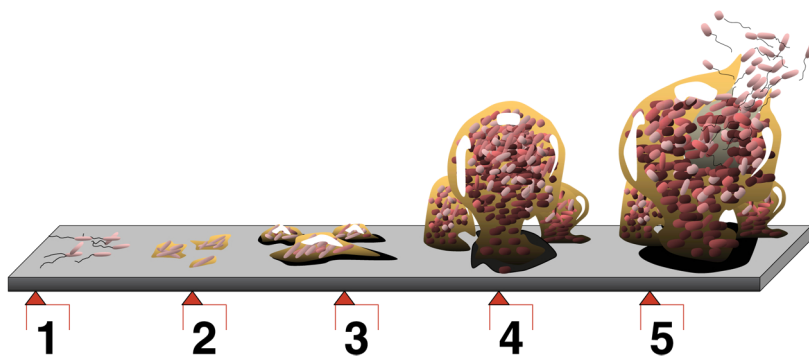
2.7 Medisinsk bruk av ultralyd

Vi har i dag ein utstrakt bruk av ultralyd innan medisin og det fins mange bruksområder for ultralyd. Mellom anna blir ultralyd nytta til medisinsk avbilding i samband med diagnostikk, som t.d. undersøking av gravide eller pasientar med hjertefeil, og ultralyden blir då nytta som eit slags ekkolodd for å sjå inn i kroppen vår. Ultralyd er også vanleg i meir terapeutiske samanhengar. Nyresteinar kan fjernast ved å knuse dei med ultralyd som har svært høg intensitet og som er fokusert spesielt mot nyresteinen. Ultralyd er nytta av tannlækjarar til å reinse tenner, så vi veit allereie ein del om korleis ultralyd kan nyttast til medisinsk bruk. Men

det er førebels lite litteratur som viser at kavitasjon kan vere eit nyttig fenomen innan medisin.

2.7.1 Biofilm

Ein biofilm er bakteriar som har “grodd fast” på ei eller anna overflate og har danna eit mikrobiologisk økosystem som er meir motstandsdyktig enn vanlege bakteriar åleine og biofilm kan bli danna på ei rekkje ulike overflater [18, 19]. Dette vesle økosystemet utviklar seg så til å bli meir enn berre bakteriar og inneheld ofte også algar og protozo. Figur 2.10 viser korleis utviklinga av biofilm går føre seg og det er særleg når biofilmen når det fjerde stadiet at den kan bli skadeleg og vanskeleg å fjerne. Økosystemet kan vere med på å lage nye bakteriar som t.d. *Legionella* [18] og dersom biofilmen oppstår i kroppen vår kan dette skape infeksjonar.



Figur 2.10: *Utvikling av biofilm skjer i fem stadier. 1) Bakterien finn ei overflate. 2) Bakterien festar seg permanent. 3) Bakterien er i første fase av å bli omdana til biofilm 4) Biofilmen er fullt utvikla og kan no utvikle nye bakteriar. 5) Biofilmen spreier nye bakteriar ut til omgjevnadane [5].*

Særleg i samband med implantasjon av protesar, som t.d. hoftekuler eller kneprotesar, har det vist seg at biofilm er eit problem [3]. Under operasjon anten ved innsetting eller ved vedlikehald av protesane kan det lett kome bakteriar på protesen som etterkvart dannar ein biofilm på protesen som er særst motstandsdyktig mot immunsystemet. Denne biofilmen blir så årsaka til infeksjonar som kan oppstå fleire månadar etter operasjonen.

For å gjere pasienten frisk frå ein slik infeksjon er det som regel ikkje nok å berre gi pasienten medisin, det må ein ny operasjon til for å fjerne infeksjonen og biofilmen [4]. Per i dag er det ingen god, billig måte å få diagnose på ein slik infeksjon, men det byrjar å kome fleire forsøk som viser at ein kan nytte ultralyd i samband med diagnostiseringa og kanskje også til å fjerne biofilm fullstendig frå protesar [3].

Problemet ved fjerning av biofilm ligg i å kunne finne passende intensitetar på ultralyden og samstundes ha kontroll over om ein fjernar biofilmen frå overflata eller om ein drep biofilmen. Det er interesse for å ikkje drepe biofilmen slik at den losna biofilmen kan studerast nærare i laboratorium [3] og då må ein finne den eigna akustisk effekten til dette føremålet.

Kapittel 3

Metode

3.1 Utstyr

Følgjande utstyr blei nytta i samband med dette prosjektet:

- Signalgenerator: Wavetek 178 50 MHz Programmable Waveform Synthesizer (*Serienr.: AC6590409*)
- FFT analysator: Ono Sokki Dual Channel CF-940 (*Serienr.: 71011552*)
- Oscilloskop: LeCroy 9410 Dual 150 MHz (*Serienr.: 94102589*)
- Forsterkar: Instruments Inc. Kilowatt Amplifier LDC3-3A (*Serienr.: 001*)
- Forsterkar: Instruments Inc. Kilowatt Amplifier M4 (*Serienr. 011*)
- Transduser: Airmar Sealcast M155 11 x 21° (*Serienr.: 727291 og 727281*)

- Hydrofon: Brüel & Kjær 8103 (*Serienr.: 1080718*)
- Hydrofonkalibrator: Brüel & Kjær 4223 (*Serienr.: 1152567*)
- Ladningsforsterkar: Brüel & Kjær 2626 Conditioning Amplifier (*Serienr.: 562538*)
- Ultralydbad: Bandelin Sonorex DK 255 P (*Serienr.: 782.00048887.010*)
- Akvarietank (Størrelse: 505x235x283 mm)
- Syllindrisk glaskolbe (Diameter: 40 mm, høgde: 101 mm)
- Stativ til hydrofon

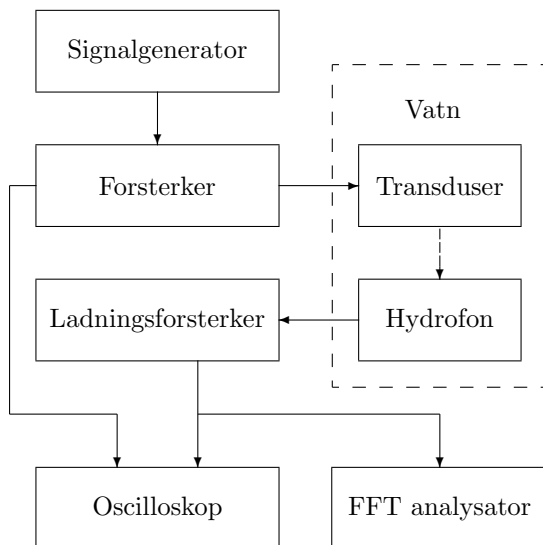
3.1.1 Avgrensingar ved utstyret

Det er viktig å merke seg avgrensingane dette utstyret gjev. Ladningsforsterkaren til Brüel & Kjær gjev oss ein øvre frekvens ved måling på oscilloskopen som i manualen er gitt som 200 kHz [20] og i tillegg har hydrofonen ein øvre frekvens gitt i manualen som 180 kHz [21]. Transduseren har høgast verknadsgrad ved 38 kHz [22]. FFT analysatoren har ei øvre grense på 100 kHz [23] og kilowattforsterkarane nytta i forsøka har ei øvre grense på 500 kHz (Modell M4 [24]) og 175 kHz (Modell LDC3 [25]). Totalt sett sit vi att med eit frekvensområde på 0 – 175 kHz som alt utstyret kan takle, men det er berre mogleg å måle opp til 100 kHz på grunn av avgrensingane til FFT analyseapparatet.

3.2 Framgangsmåte

Utstyret blei satt opp i samsvar med signalkjeda vist i figur 3.1 og i ultralydbadet blei transduseren plassert slik at senderretninga blei rett mot transduseren som

vist i figur 3.2. Tanken blei fylt opp med vatn frå springen og ein lot vatnet stå ei god stund før målingane starta slik at store bobler kunne stige til overflata og gå over i lufta og i tillegg fekk transduseren stå på med medium intensitet (under kavitasjonsterskelen) i minst eitt minutt for å få ultralyden til å fjerne ein del bobler [13], då særleg med tanke på bobler på hydrofonen. Temperaturen til vatnet blei halde til romtemperatur, 20°C .



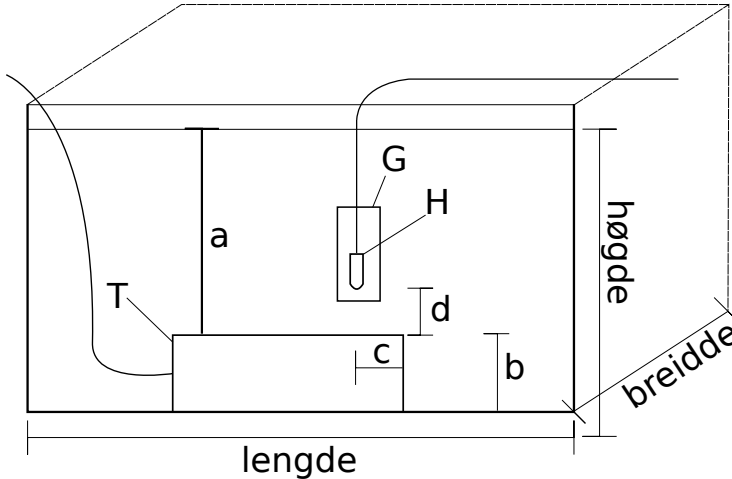
Figur 3.1: Signalkjeda i måleoppsettet. Utstyret var som følger: Signalgenerator - Wavetek 178, forsterker - Instruments Inc M4/LDC3-3A, transduser - Airmar M155, hydrofon - B&K 8103, ladningsforsterker - B&K 2626, oscilloskop - LeCroy 9410 og FFT analysator - Ono Sokki CF-940.

Signalgeneratoren frå Wavetek var innstilt til å sende ut korte pulsar av ein gitt frekvens og pulsane er på denne signalgeneratoren mogleg å stille inn til antal perioder kalla “burst count”. For å få ei gitt pulslengde t_{puls} må ein då stille inn signalgeneratoren slik at:

$$n_p = ft_{puls} \quad (3.1)$$

der n_p er antal perioder. I tillegg blei desse pulsane repetert med det same inter-

vallet kvar gong $t_{int} = 100$ ms. Sjå figur 3.3 for å sjå eksempel på eit slikt signal.

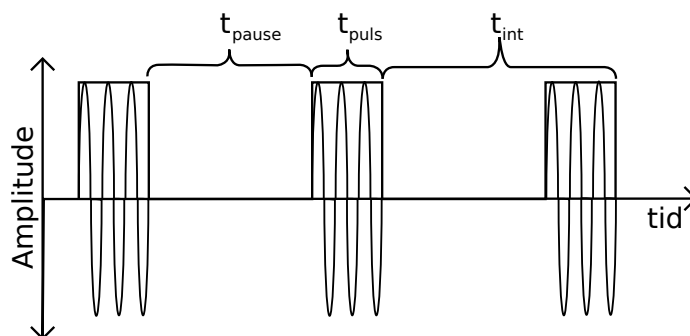


Figur 3.2: Oppsett av ultralydbad. Figuren viser ultralydbadet slik det er satt opp med ein glaskolbe rundt hydrofonen. På figuren er $a = 132$ mm, $b = 123$ mm, $c = 110$ mm, $d = 49$ mm, T er transduseren, H er hydrofonen og G er glaskolben. Glaskolben blei halde på plass ved hjelp av muelleire for å lett kunne ta den av og på mellom forsøka.

Signalet blei sendt gjennom forsterkar til transduser og lydtrykksnivået blei målt med ein hydrofon som var plassert midt på transduseren sin senderakse ved ein fast avstand $d = 49$ mm. Sjå figur 3.2. Transduseren blei plassert midt i tanken og montert slik at overflata på transduseren var $b = 126$ mm frå botnen i tanken. Ellers var vasstanden slik at $a + b = 258$ mm på figur 3.2 og hydrofonplasseringa i lengderetninga var slik at $c = 110$ mm.

3.2.1 Kommersielt ultralydbad

For å få eit inntrykk av korleis lydtrykket og frekvensspekteret er i eit kommersielt tilgjengeleg ultralydbad blei dette målt i modellen Sonorex DK255P frå Bandelin. Lydtrykket i dette badet varierar stort frå posisjon til posisjon, så målingar blei først gjort på oscilloskop for å finne ein eigna posisjon til å måle. Dimensjonane til vasstanken i ultralydbadet er $300 \times 150 \times 75$ mm og den eigna posisjonen var midt



Figur 3.3: Teoretisk eksempel på signalet ut frå signalgeneratoren. Antal perioder n_p blei variert for å få ulike pulsbreidder medan t_{int} blei halde konstant.

på i breidderetninga, 60 mm frå eine kanten i lengderetninga og med tuppen av hydrofonen 40 mm frå overflata til vatnet.

3.3 Måleteknikk

Ved målingar med ein hydrofon er det viktig å ha eit referansepunkt for å vite med sikkerheit kva trykk hydrofonen måler. Difor er ein nøydd til å bruke ein kalibrator for å få kalibrerte målingar. Ein kalibrator er laga for å gi eit kjent trykk og dermed kan ein sjekke at målingane ein gjer også får rett trykk. Gitt at kalibratoren sender ut det kjende lydtrykksnivået P_k (dB re $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$), så vil dette, når ein måler med ein hydrofon, svare til den kjende spenninga V_k (dB re 1 V) på eit måleapparat. Dersom hydrofonen som blir nytta til å måle referansetrykket i kalibratoren har sensitiviteten s (V/Pa), så har vi at:

$$V_k = 20 \log v_k, \text{ der } v_k = p_k s \quad (3.2)$$

$$V_k = 20 \log (p_k s), \text{ der } p_k = p_0 10^{P_k/20} \quad (3.3)$$

$$V_k = 20 \log (s p_0 10^{P_k/20}) \quad (3.4)$$

Gjer vi så ei måling av kalibratoren med ein hydrofon som gir den målte spenninga \widehat{V}_k på måleapparatet, så kan vi umiddelbart sjekke om hydrofona gjev oss rett spenning, med andre ord så må vi sjekke at $\widehat{V}_k = V_k$. Dersom $\widehat{V}_k \neq V_k$ er vi nøydd til å korrigere alle målingar med hydrofona slik at faktisk målt spenning for eit vilkårleg signal blir:

$$V_{faktisk} = V_m + V_{korreksjon} \quad (3.5)$$

der V_m er den målte verdien for det vilkårlige signalet og $V_{korreksjon} = V_k - \widehat{V}_k$ er verdien vi må korrigere med for å få korrekte måleverdiar. då får vi vidare:

$$V_{faktisk} = V_m + V_k - \widehat{V}_k, \quad (3.6)$$

som konvertert frå dB re 1 V til V blir:

$$v_{faktisk} = 10^{(V_m + V_k - \widehat{V}_k)/20}. \quad (3.7)$$

Får å få $v_{faktisk}$ som akustisk trykk dividerer vi med sensitiviteten til hydrofona:

$$p_{faktisk} = \frac{v_{faktisk}}{s} = \frac{1}{s} 10^{(V_m + V_k - \widehat{V}_k)/20}, \quad (3.8)$$

som vidare i lydtrykksnivå blir:

$$P_{faktisk} = 20 \log \frac{p_{faktisk}}{p_0} \quad (3.9)$$

$$P_{faktisk} = 20 \log \left(\frac{10^{(V_m + V_k - \hat{V}_k)/20}}{sp_0} \right) \quad (3.10)$$

$$P_{faktisk} = 20 \log \left(10^{(V_m + V_k - \hat{V}_k)/20} \right) - 20 \log (sp_0) \quad (3.11)$$

$$P_{faktisk} = V_m + V_k - \hat{V}_k - 20 \log (sp_0) , \quad (3.12)$$

som når vi set inn for V_k frå (3.4) blir:

$$P_{faktisk} = V_m - \hat{V}_k + 20 \log \left(sp_0 10^{P_k/20} \right) - 20 \log (sp_0) \quad (3.13)$$

$$P_{faktisk} = V_m - \hat{V}_k + P_k + 20 \log (sp_0) - 20 \log (sp_0) \quad (3.14)$$

$$P_{faktisk} = V_m - \hat{V}_k + P_k \quad (3.15)$$

For Brüel & Kjær sin kalibrator som er nytta i denne oppgåva blir dette $P_{faktisk} = V_m - \hat{V}_k + 166,1$. For kvar måleserie har då \hat{V}_k først blitt målt, deretter har alle målingane i den serien blitt gjort og blitt omrekna til faktisk lydtrykksnivå, $P_{faktisk}$.

Mellom hydrofon og oscilloskop og FFT analysator var det kopla på ein ladningsforsterkar, modell 2626 frå B&K for å forsterke det låge signalet frå hydrofonen. For å eliminere litt lågfrekvent støy var ladningsforsterkaren innstilt til å ha på eit lågfrekvent filter for å ta ut frekvensar under 30 Hz. Og sensitiviteten til akselerometeret i ladningsforsterkaren var stilt inn til 9,99 pC/g, der $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. For å sørgje for best mogleg representasjon av signalet blei ladningsforsterkaren til ei kvar tid stilt inn slik at den var mindre enn 20 dB frå maks utsignal. Dette blei gjort ved å variere system sensitiviteten mellom 0,001 – 1 V/g. Dette gir ein samla sensitivitet på 0,1 – 100 mV/pC for dei ulike instillingane.

Ono Sokki sin FFT analysator blei stilt inn til å ta gjennomsnittet av 128 FFT-målingar som så var grunnlaget for å lese av V_m i dBV for ulike frekvensar og

totaltrykket. FFT-målingane blei gjort med 2048 punkt. Med verdien V_m var det då lett å finne det faktiske lydtrykksnivået $P_{faktisk}$ gitt av (3.15).

Kapittel 4

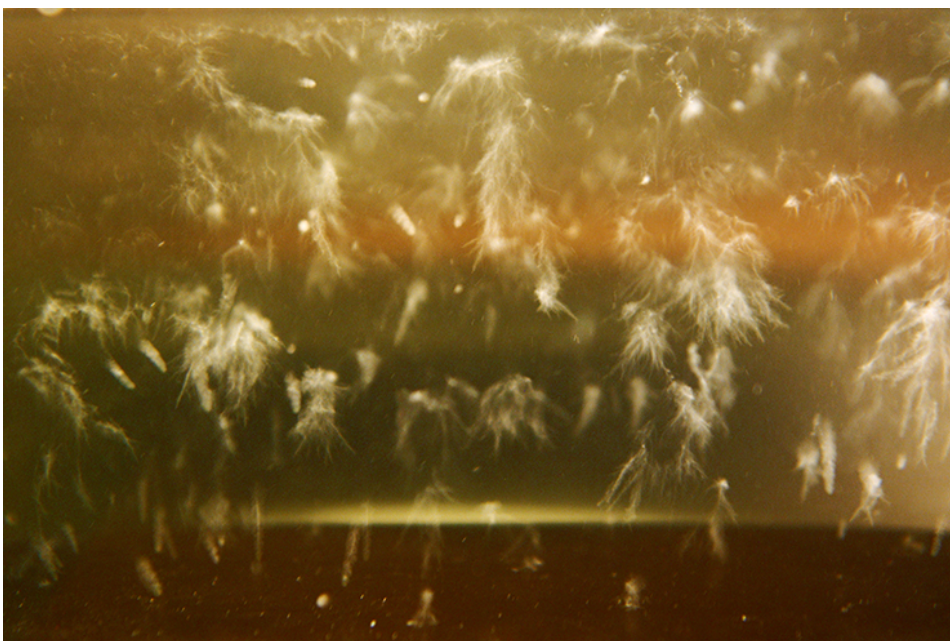
Resultat

På dei følgjande sidene vil resultatata frå arbeidet bli presentert. Diskusjon av resultatata og korleis dei høver med teorien vil bli gjort i kapittel 5. Her vil det berre stå forklaringar til kva grafane viser.

Figur 4.1 syner kor lett det kan vere å observere kavitasjonsfenomenet med det nakne auget dersom kavitasjonen er sterk nok. Dersom ein har rikeleg med lys og studerer væska nøye er det mogleg å sjå at væska kaviterer også nær kavitasjonsterskelen. Kavitasjonsfenomenet blei også filma og er å finne i [26].

For å finne kavitasjonsterskelen i dei ulike målesituasjonane blei det gjort målingar der transdusereffekten blei auka frå eit punkt godt under kavitasjonsterskelen til eit punkt godt over kavitasjonsterskelen.

Det blei gjort eit forsøk først med $f = 32$ kHz og $f = 50$ kHz for å få ei kjensle med kor mykje effekt transduseren måtte ha for å nå kavitasjonsterskelen. Resultata av desse forsøka er vist i figur 4.2. I desse forsøka blei kilowattforsterkaren M4 frå Instruments Inc. nytta og det var ikkje noko problem å nå kavitasjonsterskelen for begge frekvensane sjølv om transdusaren frå Airmar eigentleg har ein senterfrekvens på 38 kHz.

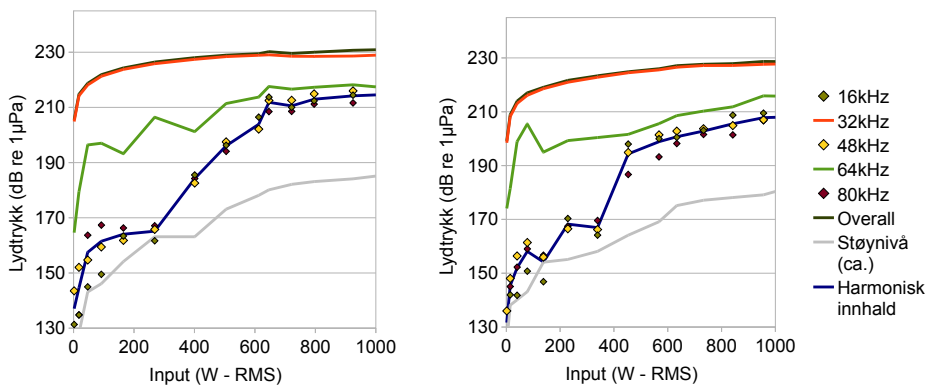


Figur 4.1: Godt over kavitasjonsterskelen er det ikkje så vanskeleg å observere kavitasjon med det nakne auget. Biletet er teke under forsøka i denne oppgåva av Per R. Leikanger og viser kaviteringa rett over transduseren. Det svarte området nedst på biletet er transduseren.

Samstundes blei også lydtrykksnivået målt i ultralydbadet til Bandelin for å sjå korleis frekvensspekteret i ein kommersielt tilgjengeleg bad såg ut noko som er vist i figur 4.3.

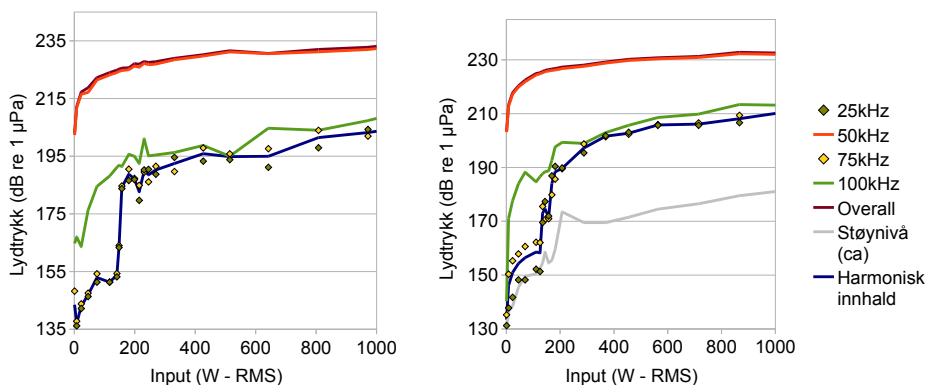
Etter å ha sett nærare på resultatata frå desse forsøka var det klart for å gjere grundigare undersøkingar med varierende pulsbreidde. Mellom det forrige forsøket og forsøka med varierende pulsbreidde hadde forsterkaren M4 fått ein øydelagd del i andre eksperiment og dei nye forsøka måtte då gjerast med Instruments Inc. LDC3 som forsterkar.

Dette viste seg å vere problematisk då den ikkje greidde å levere nok effekt til transduseren for verken $f = 32$ kHz eller $f = 50$ kHz. Forsøka måtte då gjerast for senterfrekvensen til transduseren for å utnytte den effekten forsterkaren klarte å



(a) 32 kHz og pulsbreidde 15,6 ms

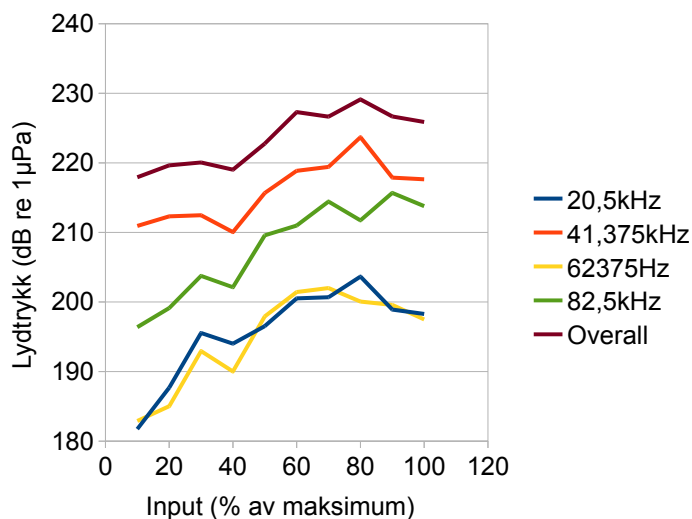
(b) 32 kHz og pulsbreidde 15,6 ms med glaskolbe



(c) 50 kHz og pulsbreidde 10 ms

(d) 50 kHz og pulsbreidde 10 ms med glaskolbe

Figur 4.2: Figuren viser lydtrykksnivået for $f/2$, f , $3f/2$, $2f$ og $5f/2$ der f er gitt under kvar graf. Støynivået er også plotta inn for tre av grafane og gjennomsnittet av lydtrykksnivået for $f/2$, $3f/2$ og $5f/2$ er gitt i kurva "Harmonisk innhald". Grafane til venstre er måling utan glaskolbe og dei til høgre er måling med glaskolbe. Tabellane for desse grafane står i vedlegg A.1, A.2, A.3 og A.4.

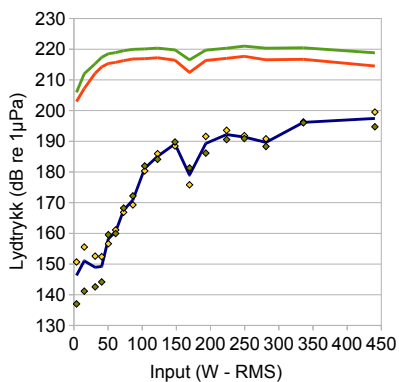


Figur 4.3: Lydtrykksnivå i Sonorex DK255P som funksjon av innstillinga på apparatet gitt i prosent. Manualen [27] til ultralydbadet oppgir topp-effekt til ultralyden som 640 W, men skriv ikkje noko om korleis prosent-innstillinga endrar effekten i badet. Tabell for denne grafen står i vedlegg A.5.

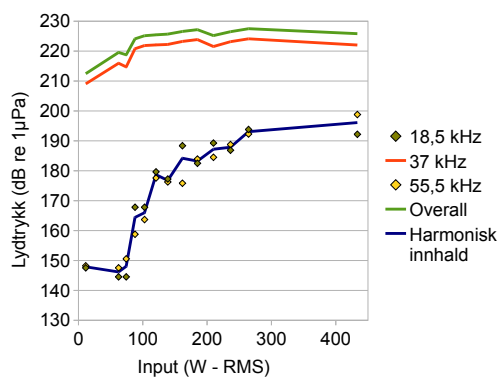
gi. Dette var ikkje særleg ynskjeleg, men det var nødvendig for å fullføre arbeidet. Senterfrekvensen er i databladet til transduseren gitt som 38 kHz, men forsøk viste at transduseren gav høgast lydtrykk ved $f = 37$ kHz, som vist i vedlegg A.16, og det var denne frekvensen som blei nytta.

Figur 4.4 og 4.5 viser resultatata frå forsøka med $f = 37$ kHz der lydtrykksnivået på dei ulike harmoniske er plotta som funksjon av transdusereffekten.

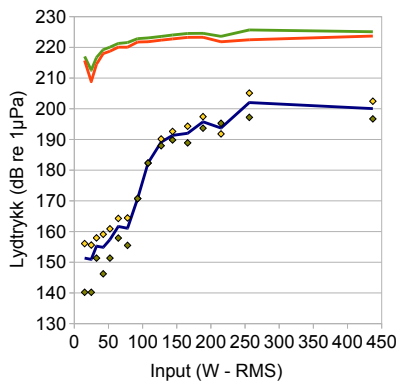
Det er ikkje alltid like enkelt å sjå nøyaktig kva tid kavitasjonsterskelen er nådd berre ved å sjå på lydtrykksnivået for dei harmoniske signala som funksjon av transdusereffekten, noko ein ser av figur 4.2(a) der framveksten av 1. subharmonisk, 1. og 2. ultraharmonisk skjer over lengre tid. Difor må ein samstundes følgje med på heile frekvensspekteret. Figurane 4.6, 4.7 og 4.8 viser frekvensspekteret slik det ser ut utan kavitasjon, akkurat når kavitasjonsterskelen er nådd og korleis det ser ut når ein har kraftig kavitasjon. Framveksten av frekvenstoppar for subharmoniske og ultraharmoniske frekvensar er tydelege og er med på å kunne fastsetje



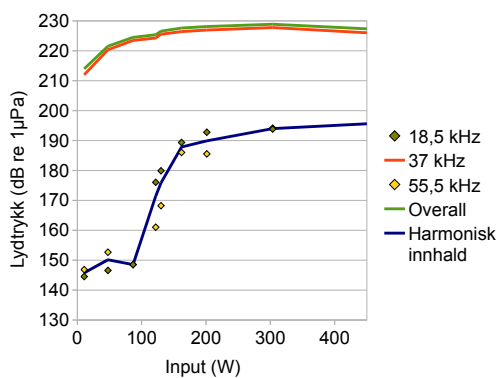
(a) Pulsbreidde 2,5 ms



(b) Pulsbreidde 2,5 ms med glaskolbe

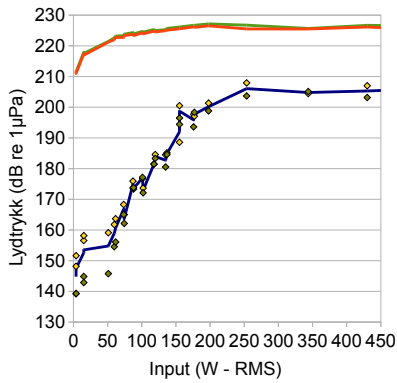


(c) Pulsbreidde 5 ms

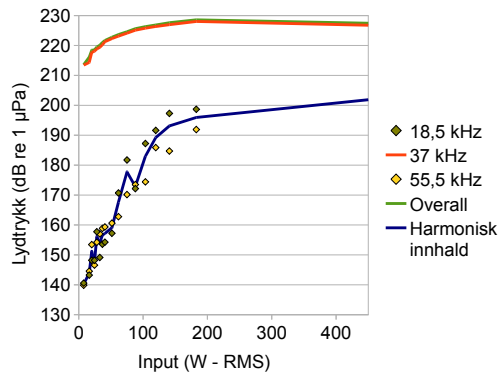


(d) Pulsbreidde 5 ms med glaskolbe

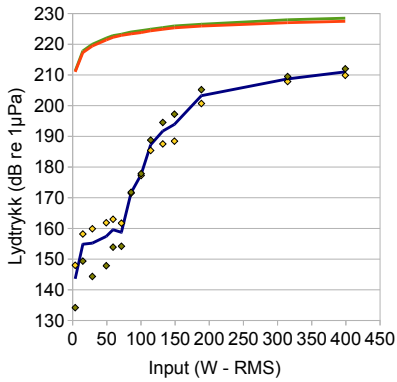
Figur 4.4: Lydtrykksnivå som funksjon av transdusereffekt for $f = 37$ kHz. Her er pulsbreidda gitt under kvar graf. Tabellane for desse grafane står i vedlegg A.6, A.7, A.8 og A.9.



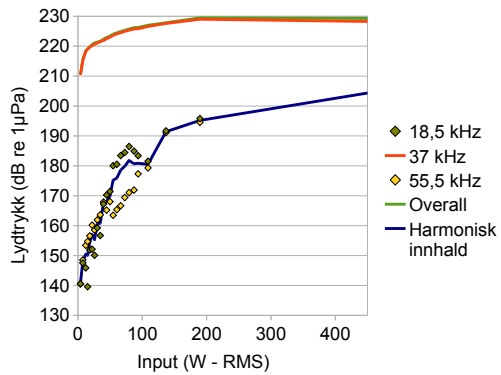
(a) Pulsbreidde 10 ms



(b) Pulsbreidde 10 ms med glaskolbe



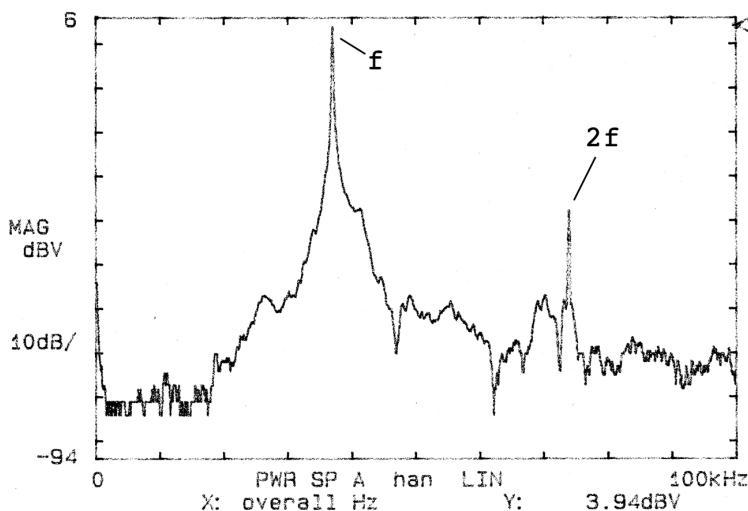
(c) Pulsbreidde 15 ms



(d) Pulsbreidde 15 ms med glaskolbe

Figur 4.5: Lydtrykksnivå som funksjon av transdusereffekt for $f = 37$ kHz. Her er pulsbreidda gitt under kvar graf. Tabellane for desse grafane står i vedlegg A.10, A.11, A.12 og A.13.

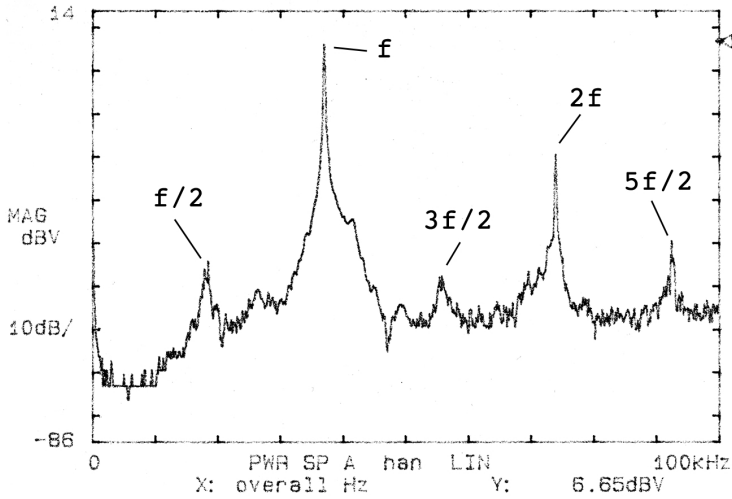
kavitasjonsterskelen. Det er verdt å merke seg at y-aksen har forskjellig dynamisk område på desse tre frekvensspektra.



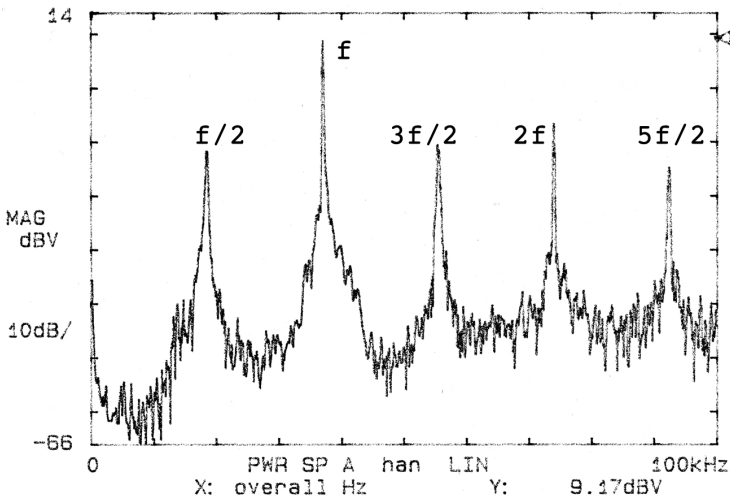
Figur 4.6: Frekvensspekter med $f = 37$ kHz under kavitasjonsterskelen. f og $2f$ er synlege, men ein ser ikkje spor av subharmoniske eller ultraharmoniske. Transdusereffekten er 59,8 W.

Eit tredje mål på at kavitasjonsterskelen er nådd får vi dersom vi lagar ein graf av kvotienten av signalstyrken til f dividert med gjennomsnittet av signalstyrken til dei subharmoniske og ultraharmoniske frekvensane som funksjon av transdusereffekten. Ein skarp og tydeleg overgang blir då tydeleg som vist i figur 4.9. Sidan grafane for kvotienten er svært lik i utsjånad for alle måleseriane er berre ein slik graf teke med for å vise at ein kan nytte det som eit verktøy til å finne kavitasjonsterskelen.

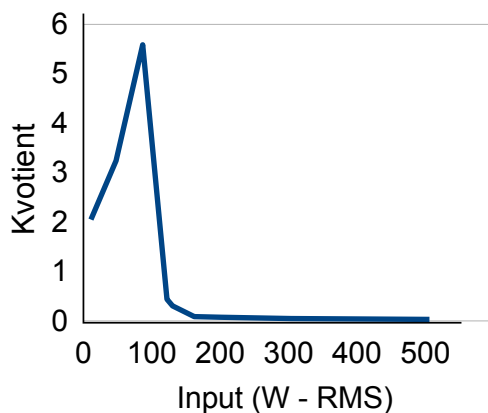
Det samla resultatet av alle målingane er gitt i figur 4.10. For å få fram denne grafen har alle metodane for å observere kavitasjonsterskelen blitt nytta for å best mogleg kunne bestemme kavitasjonsterskelen og det er det totale lydtrykket ved observert terskel som er gitt i figuren. Det er også teke med resultat frå forsøka med $f = 32$ kHz og $f = 50$ kHz. Då det er svært vanleg i litteraturen [13, 1] å vise kavitasjonsterskelen i forhold til $p = 1$ bar $\approx 10^5$ Pa, har dette også blitt gjort her.



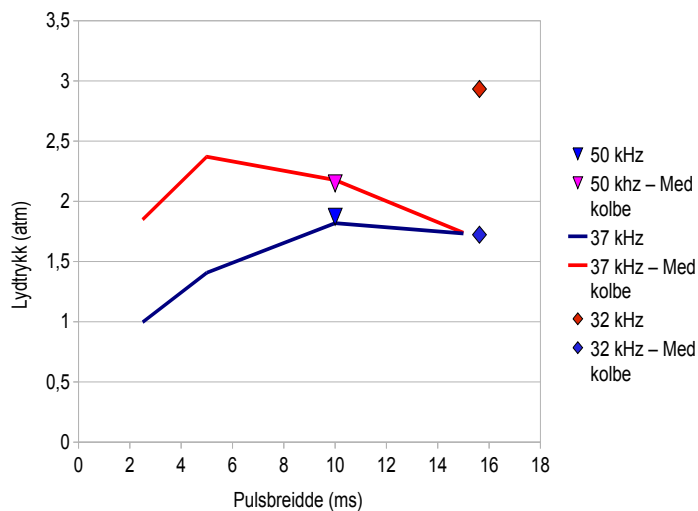
Figur 4.7: Frekvensspekter med $f = 37$ kHz rett over kavitatsjonsterskelen. Ein kan her sjå at vi har fått toppar ved 1. subharmonisk, 1. og 2. ultraharmoniske. I tillegg er det noko kvit støy over 10 kHz. Transdusereffekten er 83,3 W.



Figur 4.8: Frekvensspekter med $f = 37$ kHz godt over kavitatsjonsterskelen. Her er det svært tydelege frekvenstoppar og tydeleg kvit støy. Transdusereffekten er 430,5 W.



Figur 4.9: Figuren viser kvotienten av grunnfrekvensen dividert med det harmoniske innholdet. Eininga på y-aksen er dimensjonslaus og i størrelsesordenen 10^3 . Denne kvotienten høyrer til målingane i figur 4.4(c). Tabellen for denne grafen står i vedlegg A.14.



Figur 4.10: Kavitasjonsterskelen som funksjon av pulsbreidde for 37 kHz. Figuren viser også kavitasjonsterskelen for 32 og 50 kHz for einsskilte pulsbreiddeverdiar. Tilhøyrande tabell står i vedlegg A.15.

Kapittel 5

Drøfting

5.1 Analyse av oppsett

Ultralydbadet blei satt opp med tanke på funksjonalitet og det blei ikkje teke omsyn til noko anna enn dette. Sidan kommersielt tilgjengelege ultralydbad sjeldan har ein enorm dimensjon blei ein liten tank valgt til konstruksjon av ultralydbadet i denne oppgåva. Med dei transduserane som var tilgjengelege var det ueigna å setje opp eit ultralydbad med fleire transduserar, då det hadde blitt problematisk med tanke på plass. Forsterkarane var heller ikkje eigna til å drive fleire transduserar samstundes. Den enkle løysinga vist av signalkjeda i figur 3.1 og av oppsettet i tanken i figur 3.2 blei difor valgt.

Noko som blei oppdaga både i det kommersielle ultralydbadet og ultralydbadet satt opp i samband med denne oppgåva er at lydtrykksnivået er langt i frå jamnt distribuert igjennom vatnet. Så når ein har kontroll på kva lydtrykksnivå som gjev kavitasjon og korleis ein skal finne kavitasjonsterskelen, så vil det nok vere tenleg å nytte fleire mindre transduserar for å få eit jammare lydfelt i vatnet og dermed jamnt fordelt kavitasjon som når inn i alle sprekker og vanskeleg tilgjengelege delar av ei protese. Det kommersielle ultralydbadet har ein konstruksjon som gjev kavitering med ein innebygd forsterkar som er relativt liten og truleg spesialbygd til

transduserane sin frekvens. Forsterkarane nytta i denne oppgåva frå Instruments Inc. er store og svært tunge og dermed svært upraktiske om dei skulle vere ein del av eit ultralydbad.

5.2 Analyse av resultat

Teorien gir oss grunnlag for å kunne studere kavitasjonsfenomenet ved hjelp av akustiske målingar og den viser særleg til korleis ein ved å måle lydtrykket frå bobler som resonerer ved $f/2$, 1. subharmoniske, og ved $3f/2$, 1. ultraharmoniske, kan fastsetje kavitasjonsterskelen for ei væske, i dette tilfellet vatn.

Ser vi på det kommersielle ultralydbadet sitt lydtrykksnivå i figur 4.3 og samanliknar den med lydtrykksnivået i det konstruerte ultralydbadet, så ser vi at over kavitasjonsterskelen får vi liknande frekvensspekter i begge tankane. Sidan den kommersielle tanken er laga for å kavitere er dette eit godt teikn på kavitering i den konstruerte tanken, men dei andre metodane nytta i oppgåva for å observere kavitasjon er betre eigna til å fastsetje dette.

I arbeidet med det sjølvkonstruerte ultralydbadet har målingane vist at det er samsvar mellom teori og måling når det gjeld framveksten av desse harmoniske frekvensane. Boblene i vatnet resonerer ved dei føreslåtte frekvensane over kavitasjonsterskelen og dette kjem fram av frekvensspekteret og ved hjelp av metodane føreslått i teorien er ein då i stand til å måle kva lydtrykksnivå kavitasjonsterskelen ligg på. Visuelt kan ein då også stadfeste at vatnet kaviterer. Figur 4.2(c) og 4.4(d) er kanskje dei mest tydelege eksempla på ein rask og stor auke i lydtrykksnivået til $f/2$ og $3f/2$ noko som svarer svært godt til Neppiras sine forsøk vist i figur 2.4.

Figur 4.2(a) derimot viser ikkje ein like rask framvekst. Årsakane til dette er uvisse, men studering av frekvensspekteret på FFT analysatoren gjorde at kavitasjonsterskelen likevel kunne fastsetjast, jamfør figurane 4.6 - 4.8. Men sjølv om terskelen kunne fastsetjast er det likevel noko som ikkje stemmer overeins med resten av resultatata i denne målinga. Figur 4.10 viser at terskelen ikkje svarar til resten av målingane då terskelen her er tydeleg høgare enn for resten av målingane. Kva som kan vere grunnen til dette er uvisst, men då dette var det aller første forsøket og vatnet frå springen nyleg hadde blitt tappa opp i tanken er det mogleg at det framleis var ein redundans av små luftbobler i tanken noko som endra korleis vatnet

oppførte seg.

Kavitasjonsterskelen viste seg å vere høgare enn den teoretiske terskelen vist i figur 2.8. Dette er truleg fordi den teoretiske terskelen er for eit konstant trykk medan det i denne oppgåva har blitt nytta korte pulsar, så det er godt mogleg at dei korte pulsane gjer at kavitasjonen ikkje greier å bli satt i gang utan at trykket er høgare.

Ein viktig del av arbeidet var å undersøkje om væska på innsida av ein kolbe av glas også kaviterer når væska rundt kaviterer. Målingane gjort på innsida av kolben viser tydeleg at kavitasjonsterskelen blir nådd og at det dermed må vere kavitasjon på innsida av kolben. Dette er ein føresetnad dersom kavitasjon i det heile skal bli nytta til å fjerne biofilm frå proteser og er dermed ei viktig stadkrefing. I tillegg har vi vist at ein ikkje treng eit kontinuerleg akustisk trykk for å setje i gang kavitasjon noko som truleg er ynskjeleg om ein berre vil fjerne biofilmen frå proteseoverflata og ikkje drepe bakteriane i biofilmen.

Neppiras [13] skriv at ein må passe på at det ikkje er bobler som sit fast på hydrofonen under målingar då bobler med rett storleik kan sende ut resonansfrekvensar som hydrofonen fangar opp. Figur 2.3 viser at signalet til 1. subharmoniske for $f = 38$ kHz kan då ved låge transducerspenningar få eit plutselig hopp til 60 μ bar eller 6 Pa. Auken i signalet til 1. subharmoniske i målingane gjort i denne oppgåva er mykje større. Her når 1. subharmoniske eit lydtrykksnivå på over 180 dB re 1 μ Pa eller 1 kPa. Så vi har ikkje fått falske indikasjonar på kavitasjonsterskelen.

Figur 4.10 viser det viktigaste resultatet av denne oppgåva. Den viser kavitasjonsterskelen som funksjon av pulsbreidda, t_{puls} . Vi ser at kavitasjonsterskelen er forskjellig på innsida av glaskolben for $t_{puls} < 15$ ms og dess kortare puls dess større forskjell er det. Det ser ut til at for korte pulsar skal det eit mykje høgare trykk til før kavitasjonen blir satt i gang inne i glaskolben. Dette kan anten vere på grunn av at volumet til vatnet inne i glaskolben er mykje mindre enn volumet i heile tanken, eller så kan det vere at lydfeltet blir endra når glaskolben blir introdusert til systemet på ein slik måte at kavitasjonsterskelen blir endra for mediumet. Men i følgje utrekningane frå likning (2.3), så skal det vere svært lågt transmisjonstap gjennom glasveggen i kolben, så det verkar rart om det skulle endre lydfeltet på ein slik måte.

I alle høve så er kavitasjonsterskelen lik både med og utan glaskolben for $t_{puls} = 15$ ms og hadde ein fått målingar for enda større pulsar ville nok denne trenden

heldt fram. Men som forklart i neste delkapittel var ikkje dette mogleg.

5.3 Problem undervegs med utstyr

Sidan det i ultralydsamanheng ikkje er særleg stor skilnad på 32 kHz, 37 kHz og 50 kHz¹ er det ikkje sikkert det gjorde noko at ein var nøydd til å fortsette målingar på ein ny frekvens etter dei førebuande målingane. Ut i frå resultatata i figur 4.10 kan det sjå ut som om desse tre frekvensane har omlag same kavitasjonsterskel for desse pulsbreiddene (om ein ser bort i frå den verdien som ikkje er i samsvar med resten) og den teoretiske kavitasjonsterskelen gitt i figur 2.8 viser også at skilnaden i terskelen frå 32 – 50 kHz er liten.

Det hadde vore ynskjeleg å halde fram å måle terskelen for ende større verdiar for t_{puls} , men forsterkarane nytta i arbeidet greidde ikkje å gi nok effekt for større pulsar over lengre tid til å nå kavitasjonsterskelen.

¹I litteraturen om kavitasjon er det ofte nytta frekvensar over 1 MHz, så skilnaden mellom 32 – 50 kHz er verkeleg liten i en slik samanheng

Kapittel 6

Konklusjon

Dette arbeidet skulle kaste lys på om ultralydbad kan vere gunstig å bruke til å fjerne biofilm på proteser. Då særleg med tanke på kavitasjon og om dette fenomenet i det heile eksisterar inne i ein steril glaskolbe der ei protese må vere dersom det skal kunne plasserast i eit ultralydbad. Forsøka viser tydeleg at kavitasjonsfenomenet eksisterer også på innsida av glaskolben og at det difor kan vere med på å fjerne biofilm på overflata av ei protese. Det viser seg også at ein ikkje er nøydd til å ha eit kontinuerleg akustisk trykk for å få vatnet til å kavitere og dersom ein kan bruke korte pulsar for å få kavitasjon, så vil den totale akustiske effekten over tid bli mindre og som ein følgje av det igjen er det større sannsyn for at dei store kreftene i kavitasjonen berre ristar laus biofilmen og ikkje drep den, jamfør ynskja til Monsen et al. [3].

Eit framlegg til konstruksjon av eit ultralydbad er å nytte pulsar med breidde 15 ms og med ein pulsrepetisjon kvart 100. ms, eller ein repetisjonsrate på 10 Hz. Transuseren kan sende ut ein frekvens i området 30 – 50 kHz då alle desse frekvensane ser ut til å gi same kavitasjonsterskel for denne pulsbreidda. Dette vil gje same kavitasjonsterskel både i tanken utan glaskolbe og inne i ein glaskolbe slik at ein berre treng å finne kavitasjonsterskelen for ultralydbadet utan noko i. Dette gjer konstruksjonen og innstillinga av forsterker og transduser mykje enklare enn om ein måtte måle inne i ein glaskolbe. Dersom tanken har nokolunde same dimensjonen som nytta i dette arbeidet burde det akustiske trykket i tanken liggje på omlag

180 kPa eller ca. 225 dB (re 1 μ Pa).

Resultata viser også at teorien som Neppiras foreslår [12], absolutt er god nok til dette føremålet og særleg teorien bak observering av kavitasjonsterskelen ser ut til å gjelde i det konstruerte ultralydbadet.

6.1 Vidare arbeid

Vidare arbeid bør vere å bruke den føreslegne konstruksjonen av ultralydbadet og teste dette på proteser eller liknande overflater for å sjå om det har ynskt effekt på biofilmen. Dersom den føreslegne pulsbreidda og repetisjonsraten ikkje losnar biofilm frå protesene må ein auke pulsbreidde eller auke repetisjonsratene for å få ein større samla akustisk effekt. Dersom biofilmen blir drepen og ikkje let seg studere i etterkant bør ein prøve å nytte lågare pulsbreidde eller lågare repetisjonsrate. Men skal ein endre på dette må ein følgje med om ein framleis får vatnet til å kavitere ved å sjå på figur 4.10.

I tillegg burde vidare arbeid fokusere på å lage eit jamnare lydfelt enn det ein har oppnådd i denne oppgåva. Dersom biofilmen ligg over alt på ein relativt stor protese må ein ha eit jamnt lydfelt for å losne biofilmen overalt noko som er svært viktig.

Like the dew on the mountain,
like the foam on the river,
like the bubble on the fountain,
thou art gone — and for ever!

Walter Scott

Tillegg A

Tabellar

Her i vedlegg A ligg tabellar til samtlege grafar i denne oppgåva unnateke dei grafane som har blitt plotta ved hjelp av Matlab. For meir forklaring av innhaldet i tabellane sjå figurane dei høyrer til.

Tabell A.1: *Drivende frekvens 32 kHz, utan glaskolbe og pulsbreidda 15, 6 ms*

Output (W)	16kHz	32kHz	48kHz	64kHz	80kHz	96kHz	Overall	Støynivå (ca.)	H. innhald
2,04	131,33	204,89	143,52	164,62	128,78	152,22	205,48	123,12	137,08
17,91	134,8	214,23	152,04	179,44	134,8	173,12	214,79	128,12	144,61
46,81	144,97	218,13	154,7	196,4	163,68	193,64	218,75	143,12	157,49
91,91	149,51	221,29	159,42	197,02	167,34	194	221,88	146,12	161,49
164,85	163,4	223,78	161,81	193,23	166,31	189,47	224,3	154,12	164,04
268,53	161,66	225,85	165,77	206,44	167,11	196,87	226,44	163,12	165,14
400,76	185,52	227,43	182,59	201,23	184,22	197,21	228,02	163,12	184,19
504,84	196,28	228,42	197,52	211,42	194,09	203,99	228,94	173,12	196,08
612,53	206,48	228,89	202,13	213,75	202,27	206,44	229,46	178,12	203,87
646,43	213,73	229,05	212,51	217,58	208,48	211,06	230,21	180,12	211,85
721,51	210,04	228,54	212,59	216,61	208,57	211,09	229,57	182,12	210,56
795,94	212,38	228,5	214,91	217,3	211,19	211,55	230,01	183,12	212,97
924,69	214,43	228,62	216	218,19	211,63	213,45	230,7	184,12	214,2
1076,89	214,93	229,25	216,61	216,7	212,67	214,66	231,1	186,12	214,88
1155,9	216,87	226,91	216,72	218,55	211,53	216,53	230,23	188,12	215,37

Tabell A.2: Drivande frekvens 32 kHz, med glaskolbe og pulsbreidde 15, 6 ms

Output (W)	16kHz	32kHz	48kHz	64kHz	80kHz	96kHz	Overall	Støynivå (ca.)	H. innhald
1,68	126,84	198,47	135,98	174,07	129,51	164,25	199,14	124,12	131,66
14,45	141,96	208,2	148,07	181,41	145,05	179,96	208,87	138,12	145,38
40,08	141,79	213,07	156,41	198,9	152,24	195,99	213,93	140,12	151,99
77,92	150,76	216,1	161,39	205,45	159,03	198,95	217,02	143,12	158,11
137,85	146,84	218,57	155,98	195	156,69	187,58	219,08	154,12	154,17
228,61	170,32	220,96	166,5	199,27	167,44	197,08	221,66	155,12	168,24
339,08	164,14	222,82	166,22	200,41	169,58	197,36	223,36	158,12	166,94
453,1	197,98	224,48	194,87	201,59	186,7	197,63	224,84	164,12	194,34
567,4	199,98	225,56	201,41	205,57	193,22	201,25	225,97	169,12	198,86
633,61	200,49	226,56	202,8	208,56	198,18	204,26	227,12	175,12	200,69
732,9	203,07	227,17	203,69	210,24	201,57	206,8	227,64	177,12	202,82
841,87	208,73	227,2	204,86	211,83	201,4	208	227,88	178,12	205,51
955,77	209,48	227,62	207	215,91	206,64	209,26	228,68	179,12	207,8
1027,57	208,32	227,8	209,39	215,76	206,02	208,73	228,63	181,12	208,02
1082,44	208,95	227,99	207,44	215,47	204,9	209,34	228,55	181,12	207,25

Tabell A.3: Drivande frekvens 50 kHz, utan glaskolbe og pulsbreidde 10 ms

Output(W)	25kHz	50kHz	75kHz	100kHz	Overall	Harmorisk innehald
0,98	132,46	202,32	148,23	164,76	203,03	143,52
7,91	136,19	211,87	137,8	166,99	212,21	137,03
23,02	142,21	216,51	143,82	163,71	217,27	143,05
45,66	146,36	217,13	147,53	176,3	218,76	146,96
74,96	151,35	221,43	154,25	184,54	222,26	152,92
116,9	151,35	223,21	151,35	188,14	223,99	151,35
140,85	153,18	224,01	154,32	191,14	224,84	153,77
147,95	163,35	224,39	164,04	191,89	225,22	163,7
157,34	183,76	224,72	184,67	191,45	225,56	184,23
180,38	186,59	225	190,51	195,68	225,65	188,77
198,99	186,91	226,3	187,32	194,99	227,09	187,12
214,78	179,7	225,87	184,9	192,5	226,92	182,68
231,17	190,26	227,23	189,48	200,99	227,84	189,88
245,51	190,45	226,72	186,11	195,13	227,53	188,55
269,92	188,76	226,96	191,52	195,45	227,79	190,25
331,35	194,6	228,46	189,69	196,31	228,94	192,49
426,53	193,29	229,73	197,86	198,74	230,19	195,87
514,37	193,82	231,17	195,82	195,01	231,56	194,88
642,14	191,15	230,55	197,63	204,71	230,62	194,98
807,9	197,93	231,2	203,97	204	232,03	201,46
971,5	204,29	232	201,98	207,35	232,79	203,21
1176,09	204,23	234,52	208,09	212,87	235	206,37
1435,21	211,52	234,65	212,49	217,77	235,14	212,02
1569,4	213,83	233,93	212,95	215,87	234,56	213,4

Tabell A.4: Drivande frekvens 50 kHz, med glaskolbe og pulsbreiddde 10 ms

Output(W)	25kHz	50kHz	75kHz	100kHz	Overall	Støynivå (ca)	Harmonisk innhald
0,95	131,24	203,14	135,22	140,34	203,42	129,51	133,46
8,44	137,8	212,78	150,36	171,04	213,28	136,51	146,18
23,43	141,75	217,25	155,33	177,65	217,77	138,51	150,96
45,09	148,23	219,9	157,89	183,97	220,34	145,51	154,34
69,93	148,23	221,86	160,65	188,24	222,46	149,51	156,49
110,59	152,21	224,38	162,21	184,65	224,93	150,51	158,58
125,26	151,35	224,83	162,08	186,62	225,21	152,51	158,28
134,89	169,56	225,2	175,51	187,68	225,72	154,51	173,03
143,87	177,35	225,58	170,57	188,42	226,06	158,51	174,61
157,34	171,95	225,87	170,97	188,73	226,39	154,51	171,47
169,21	186,88	226,07	179,83	192,69	226,6	155,51	184,05
181,51	190,43	226,22	185,66	197,64	226,76	159,51	188,37
207,41	189,83	226,74	189,53	199,35	227,31	173,51	189,68
288,26	195,42	227,59	198,75	198,93	228,04	169,51	197,24
369,28	201,81	228,81	201,44	202,97	229,19	169,51	201,63
454,9	203,08	229,76	202,36	205,67	230,2	171,51	202,73
563,38	205,67	230,36	205,91	208,56	230,77	174,51	205,79
714,72	205,67	230,87	206,56	209,83	231,26	176,51	206,13
866,55	206,65	232,26	209,37	213,39	232,8	179,51	208,12
1038,43	208,14	231,97	212,59	213,12	232,47	181,51	210,65
1211,11	208,95	233,24	213,7	213,43	233,85	179,51	211,65
1464,15	211,43	233,87	211,66	216,84	234,35	182,51	211,55

Tabell A.5: *Målingar gjort med eit kommersielt ultralydsbad*

Styrke (%)	20,5kHz	41,375kHz	62375Hz	82,5kHz	Overall
10	181,73	210,93	182,9	196,38	217,93
20	187,68	212,31	185,02	199,13	219,64
30	195,55	212,47	192,94	203,76	220,06
40	194,01	210,04	190,01	202,12	219,02
50	196,53	215,67	197,93	209,58	222,77
60	200,52	218,86	201,43	210,99	227,3
70	200,68	219,42	202	214,44	226,64
80	203,65	223,69	200,06	211,73	229,12
90	198,91	217,88	199,58	215,68	226,67
100	198,28	217,63	197,49	213,78	225,88

Tabell A.6: *Drivande frekvens 37 kHz, utan glaskolbe og pulsbreidde 2,5 ms*

Input (W)	18,5 kHz	37 kHz	55,5 kHz	Overall	Harmonisk innhald
3,77	137,02	202,97	150,68	205,94	146,3
15,1	141,17	207,19	155,55	212,02	151,05
31,08	142,58	212,15	152,58	215,27	148,95
40,67	144,18	214,24	152,41	217,37	149,24
50,34	159,57	215,35	156,62	218,51	158,22
61,05	159,95	215,72	161,11	218,91	160,55
72,78	168,24	216,29	166,87	219,52	167,58
86,33	172,21	216,82	169,28	219,97	170,87
103,6	181,96	216,91	180,35	220,08	181,19
122,44	184,13	217,21	185,96	220,36	185,09
147,95	189,77	216,42	188,47	219,77	189,14
169,21	181,31	212,43	175,82	216,53	178,99
193,07	186,15	216,33	191,59	219,7	189,29
223,53	190,58	217,03	193,58	220,32	192,21
249,5	190,9	217,68	191,84	221	191,38
281,13	188,31	216,56	190,8	220,33	189,64
335,98	196,03	216,71	196,3	220,46	196,17
440,6	194,73	214,53	199,51	218,82	197,44

Tabell A.7: *Drivande frekvens 37 kHz, med glaskolbe og pulsbreidde 2,5 ms*

Input (W)	18,5 kHz	37 kHz	55,5 kHz	Overall	Harmonisk innhald
11,36	147,55	209,05	148,23	212,45	147,9
62,38	144,54	215,94	147,55	219,56	146,17
74,23	144,54	214,73	150,56	218,77	148,06
87,91	167,81	220,8	158,77	224,1	164,42
102,74	167,81	221,87	163,68	225,15	165,99
120,58	179,65	222,07	177,59	225,45	178,68
138,85	177,25	222,24	176,27	225,68	176,77
161,61	188,37	223,23	175,83	226,57	184,19
184,94	182,5	223,86	183,91	227,17	183,23
209,85	189,26	221,54	184,5	225,19	187,2
236,34	186,85	223,16	188,76	226,5	187,86
264,39	193,81	224,11	192,28	227,5	193,08
433,53	192,19	222,04	198,8	225,83	196,11

Tabell A.8: *Drivande frekvens 37 kHz, utanglaskolbe og pulsbreidde 5 ms.*

Input (W)	18,5 kHz	37 kHz	55,5 kHz	Overall	Harmonisk innhald
15,1	140,21	215,73	156,08	217,05	151,36
24,84	140,21	208,84	155,6	212,56	150,94
32,51	151,35	214,51	157,93	216,7	155,25
42,3	146,23	217,97	159,11	219,25	154,87
52,16	151,35	218,76	160,89	220,07	157,37
64,39	157,88	220,07	164,28	221,29	161,66
77,92	155,5	220,05	164,44	221,57	161,07
92,73	170,73	221,75	170,76	222,85	170,75
107,94	182,34	221,85	182,28	223,08	182,31
127,16	187,96	222,36	190,16	223,57	189,13
143,87	189,83	222,76	192,62	224,03	191,34
165,93	188,89	223,27	194,31	224,54	192,02
188,41	193,68	223,3	197,43	224,58	195,76
214,78	195,28	221,83	191,81	223,6	193,72
256,22	197,2	222,49	205,11	225,68	202,03
437,06	196,71	223,69	202,46	225,09	200,05

Tabell A.9: *Drivande frekvens 37 kHz, med glaskolbe og pulsbreidde 5 ms*

Input (W)	18,5 kHz	37 kHz	55,5 kHz	Overall	Harmonisk innhald
10,71	144,54	212	146,85	213,98	145,77
47,58	146,58	220,35	152,66	221,53	150,14
86,6	148,52	223,46	148,52	224,5	148,52
121,87	176,04	224,28	161,02	225,36	171,44
130,06	179,89	225,55	168,21	226,57	175,88
161,99	189,35	226,43	186,02	227,61	187,84
201,28	192,79	226,94	185,55	228,11	189,9
303,67	193,83	227,77	194,15	228,89	193,99
505,79	194,03	225,37	197,95	226,76	196,21

Tabell A.10: *Drivande frekvens 37 kHz, uten glaskolbe og pulsbreidde 10 ms*

Input (W)	18,5 kHz	37 kHz	55,5 kHz	Overall	Harmonisk innhold
3,76	139,24	211,46	148,17	211,95	144,81
3,82	139,31	211,01	151,63	211,58	147,49
15	144,84	217,38	156,58	217,91	152,56
15,1	142,88	216,96	158,17	217,54	153,53
50,95	145,77	221,21	159,11	221,45	154,78
59,74	154,56	222	161,79	222,6	158,91
61,71	156,08	222,72	163,67	223,2	160,68
73,51	165,02	222,74	168,3	223,31	166,81
74,23	162,15	223,33	165,02	223,8	163,7
87,12	173,69	223,76	175,92	224,35	174,88
87,91	173,79	223,34	173,37	223,91	173,58
101,04	177,16	224,24	176,73	224,71	176,95
101,89	172,12	223,92	173,65	224,45	172,92
117,81	181,48	224,8	181,46	225,31	181,47
119,65	183,32	224,52	184,57	224,97	183,97
134,89	180,54	224,94	184,48	225,29	182,73
136,86	184,6	225,11	185,13	225,68	184,87
155,23	194,43	225,56	188,58	226,15	191,99
155,23	196,48	225,57	200,52	226,15	198,73
175,87	193,6	226,18	197,66	226,68	195,87
176,99	198,34	226,01	197,08	226,68	197,73
197,8	198,81	226,51	201,34	227,15	200,17
253,52	203,68	225,52	207,92	226,73	206,06
343,76	205,11	225,48	204,47	225,65	204,8
430,02	203,17	226,15	206,99	226,68	205,29
737,48	207,85	222,94	208,08	225,88	207,97

Tabell A.11: *Drivande frekvens 37 kHz, med glaskolbe og pulsbredde 10 ms*

Input (W)	18,5 kHz	37 kHz	55,5 kHz	Overall	Harmonisk innhald
7,72	140,56	213,43	139,86	213,56	140,22
16,27	143,23	214,33	144,54	216,07	143,91
20,19	148,2	217,68	153,44	218,42	151,21
24,42	148,2	218,09	146,58	218,51	147,43
28,09	157,74	218,85	154,22	219,47	156,16
32,7	149,13	219,39	157,02	220,07	153,94
36,73	153,57	220,21	158,86	221	156,61
40,67	154,25	221,26	159,34	221,67	157,16
51,55	157,23	222,3	160,6	222,76	159,08
61,71	170,7	223,13	162,77	223,65	167,61
74,96	181,72	224,11	170,16	224,59	177,74
87,91	172,16	225,12	173,5	225,61	172,86
103,6	187,23	225,79	174,41	226,31	183
119,65	191,62	226,35	185,87	226,87	189,21
140,85	197,3	226,96	184,71	227,62	193,11
182,65	198,68	228,03	191,9	228,57	195,94
518,21	204,13	226,46	202,56	227,15	203,38

Tabell A.12: *Drivande frekvens 37 kHz, utan glaskolbe og pulsbredde 15 ms*

Input (W)	18,5 kHz	37 kHz	55,5 kHz	Overall	Harmonisk innhald
3,71	134,19	211	148	211,31	143,59
14,87	149,35	217,27	158,19	217,84	154,85
28,77	144,36	219,44	159,89	220,01	155,21
49,15	147,85	221,4	161,85	222,01	157,41
59,08	153,9	222,26	162,99	222,84	159,58
71,35	154,19	222,9	161,71	223,27	158,74
85,55	171,77	223,39	171,5	224	171,64
100,19	177,82	223,81	177,25	224,44	177,54
114,17	188,79	224,39	185,4	224,89	187,26
131,97	194,53	224,89	187,54	225,43	191,72
148,98	197,23	225,36	188,44	225,95	193,9
188,41	205,2	225,93	200,7	226,52	203,24
314,65	209,49	227,03	207,86	227,97	208,71
399,07	212,01	227,5	209,88	228,5	211,01

Tabell A.13: *Drivande frekvens 37 kHz, med glaskolbe og pulsbredde 15 ms*

Input (W)	18,5 kHz	37 kHz	55,5 kHz	Overall	Harmonisk innhald
3,82	140,56	210,43	140,56	210,47	140,56
7,49	147,55	215,08	148,52	215,57	148,05
12,11	145,88	218,34	153,44	218,42	150,46
14,97	139,59	218,98	154,71	219,07	150,09
18,41	151,9	219,71	156,58	219,79	154,55
22,02	152,14	220,15	160,17	220,54	157,05
25,81	150,1	220,65	158,54	221,14	155,31
30,05	159,25	221,03	161,93	221,37	160,69
34,66	156,69	221,55	163,63	221,63	160,84
39,71	167,23	221,87	167,9	222,35	167,57
44,53	170,25	222,52	165,19	222,9	168,08
49,75	171,42	222,98	168,04	223,39	169,89
54,63	180,03	223,61	163,47	224,03	175,21
60,39	180,52	224,12	165,35	224,44	175,9
66,44	183,43	224,53	166,65	224,92	178,58
72,78	184,45	224,96	169,4	225,31	179,84
79,41	186,47	225,34	171,06	225,71	181,81
87,12	184,94	225,77	171,9	226,2	180,67
93,54	183,38	225,82	177,32	226,27	180,87
108,82	181,53	226,58	179,31	226,98	180,49
136,86	191,68	227,59	191,12	227,82	191,4
189,57	195,79	229,01	194,55	229,45	195,19
520,14	205,26	228,07	208,08	229,25	206,78

Tabell A.14: *Forholdet mellom grunnfrekvens og harmonisk innhald.*

Input (W)	Ratio	37 kHz	Harmoni
10,71	2048,43	39810,72	19,43
47,58	3239,12	104111,81	32,14
86,6	5584,7	148936,11	26,67
121,87	438,63	163681,65	373,17
130,06	304,4	189452,35	622,38
161,99	84,98	209652,48	2467,07
201,28	71,09	222330,99	3127,33
303,67	48,86	244624,53	5006,95
505,79	28,71	185566,68	6463,45

Tabell A.15: Kavitasjonsterskel for ulike pulsbreidder

Burst width	37 kHz	37 kHz – Med kolbe	32 kHz	32 kHz – Med kolbe	50 kHz	50 kHz – Med kolbe
2,5	1	1,85				
5	1,41	2,37				
10	1,82	2,18			1,87	2,15
15	1,73	1,74				
15,63			2,93		1,72	

Tabell A.16: *Målinger gjort med oscilloskop for å finne transduceren sin senterfrekvens. Transduseren hadde heile vegen ein konstant effekt på 140 W*

Frekvens (kHz)	Lydtrykk (kPa)	Lydtrykksnivå (dB re 1 μ Pa)
36,6	79,76	218,04
36,8	82,44	218,69
37,0	86,04	219,05
37,2	88,32	218,96
37,4	89,64	218,83
37,6	88,75	218,72
37,8	86,04	218,69
38,0	82,44	218,32
38,2	80,19	218,08
38,4	78,84	217,93

Tillegg B

Matlabkode

Her følger all matlabkode nytta i arbeidet med denne oppgåva.

B.1 Transmisjonstap

```
1 % Plot av transmisjonstap
2
3 rv = 1.48e6; %akustisk impedans til vatn
4 rg = 15e6; %akustisk impedans til glas
5 f = 16:0.5:100; %frekvens i kilohertz
6 cg = 3962; %lydfarten i glas
7 kg = 2*pi*1000*f./cg; %bølglengjetalet for glas
8 L = 0.001; %breidda p? glaskolbeveggen
9
10 Tcoeff = 1./(1+0.25*(rg/rv)^2*(sin(kg*L*2*pi/360)).^2);
11 %transmisjonskoeffisient
12
13 TL = 10.*log10(1./Tcoeff); %Transmisjonstap
14
15 semilogx(f, TL)
```

B.2 Resonans i luftbobler

```
1 % Plot at resonansfrekvens for gitt bobleradius
2
3 f = 16:100; % frekvensomr?de
4 r = 1000; % tettleik i vatn
5 g = 1.4; % adiabatisk konstant for luft
6 P = 10000; % hydrostatisk trykk
7 R = sqrt(3*g*P/r)/(2*pi*f*1000); %bobleradius
8 semilogx(f,R) %plot av R mot f.
```

B.3 Teoretisk kavitasjonsterskel

```
1 % plot av teoretisk kavitasjonsterskel
2
3 p0 = 10^5; % hydrostatisk trykk
4 s = 0.072; % overflatespenning
5 k = 3.28; % henta fr? likning (2.7) i teorien
6 f=16000:100000; % frekvens
7
8 p = p0 + 4*s*f/(3^(1.5)*k); % kavitasjonsterskelen
9 semilogx(f,p)
```

Litteratur

- [1] F. R. Young, *Cavitation*. Maidenhead: McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [2] M. Versluis, B. Schmitz, A. von der Heydt, and D. Lohse, “How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles,” *Science*, vol. 289, no. 5487, pp. 2114–2117, 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/289/5487/2114>
- [3] T. Monsen, E. Lövgren, M. Widerström, and L. Wallinder, “In vitro effect of ultrasound on bacteria and suggested protocol for sonication and diagnosis of prosthetic infections,” *Journal of Clinical Microbiology*, vol. 47, no. 8, pp. 2496–2501, august 2009.
- [4] J. D. Pozo and R. Patel, “Infection associated with prosthetic joints,” *New England Journal of Medicine*, vol. 361, no. 8, pp. 787–794, august 2009.
- [5] D. Monroe, “Looking for chinks in the armor of bacterial biofilms,” *Public Library of Science Biology*, vol. 5, no. 11, 2007.
- [6] D. Raichel, *The Science and Applications of Acoustics*, 2nd ed. New York: Springer, January 2006.
- [7] A. D. Pierce, *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*. New York: Acoustical Society of America, 1989.

- [8] P. Etter, *Underwater acoustic modeling and simulation*. Taylor & Francis, 2003.
- [9] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of acoustics*, 4th ed. New York: Wiley, 2000.
- [10] Onda Corporation, “Acoustic properties of solids,” [Online] Tilgjengeleg: <http://www.ondacorp.com/images/Solids.pdf> [Henta: 17. juni 2010].
- [11] ——. Acoustic properties of liquids. [Online] Tilgjengeleg på denne sida: <http://www.ondacorp.com/images/Liquids.pdf> [Henta: 17. juni 2010].
- [12] E. A. Neppiras, “Acoustic cavitation thresholds and cyclic processes,” *Ultrasonics*, september 1980.
- [13] E. Neppiras, “Acoustic cavitation,” *Physics reports*, vol. 61, no. 3, pp. 159–251, 1980.
- [14] C. E. Brennen, *Cavitation and bubble dynamics*. New York: Oxford University Press, 1995.
- [15] W. Shuang-wei, F. Ruo, X. Jian-yi, and S. Qun, “Effect of ultrasound pulse width on cavitation in a small-size reverberation field,” *Ultrasonics*, vol. 31, no. 1, pp. 39 – 44, 1993. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TW2-46T4XJP-36/2/b01a335ac2535895f9c26028c0c56956>
- [16] J. M. Hovem, *Marine Acoustics: The Physics of Sound in Underwater Environments*. Los Altos: Peninsula Publishing, 2009.
- [17] National Physics Laboratory. Underwater acoustics concepts - receive sensitivity and transmit response. [Online] Tilgjengeleg: <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/concepts/sen.html> [Henta: 19. jun. 2010].
- [18] J. Bartram, *Legionella and the prevention of legionellosis*. Geneve: World Health Organization, 2007.

- [19] R. Singh, *Dictionary of Biotechnology*. New Delhi: Sarup & Sons, 2001.
- [20] Brüel & Kjær, *Product Data: Charge Amplifier - Type 2635*, Danmark, desember 2009. [Online]. Available: <http://www.bksv.com/doc/bp0099.pdf>
- [21] —, *Product data: Hydrophones - Type 8103, 8104, 8105, 8106*, Danmark, 2009.
- [22] Airmar Technology Corporation. Airmar Sealcast M155, 38 kHz. [Online] Tilgjengeleg: <http://www.echomastermarine.co.uk/transducers/Single-Beam-over-1kW/38kHz-M155-External-Transducer.html> [Henta: 16. juni 2010].
- [23] Ono Sokki Co. Ltd., *FFT Analyzer CF-900 Series - Instruction Manual*, Yokohama, 198?
- [24] Instruments Inc., *Technical Manual - Kilowatt Amplifier Model M4*, San Diego, 1983.
- [25] —, *Technical Manual - Kilowatt Amplifier Model LDC3-3A*, San Diego, 1977.
- [26] T. Sandbakk. Video av kavitasjon, 2010. [Videoopptak] Tilgjengeleg på nett: http://dl.dropbox.com/u/347228/Kavitering_Sandbakk2010.mov [Henta: 24. jun. 2010].
- [27] Bandelin Electronics. Sonorex Longlife DK 255 P. [Online] Tilgjengeleg: <http://www.bandelin.com/datenblaetter/dk/dk255p.pdf> [Henta: 16. jun. 2010].