

“Fasit” og anbefaling av poengsetting ved prosjektoppgaven i FYS2130 våren 2012:

Tema for prosjektoppgaven:

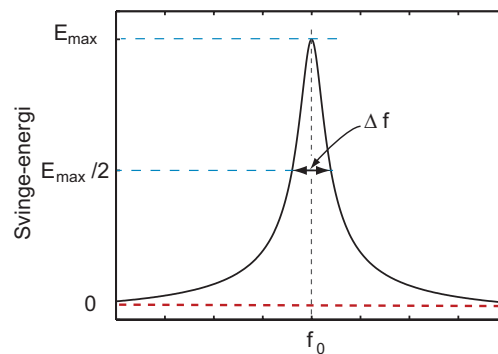
## Svingninger ved påvirkning av en tidsbegrenset oscillerende kraft.

I dette skrevet gir vi først eksempler på hvordan de ulike deloppgavene kunne løses, sammen med en anbefalt poenggivning for de enkelte delene. Deretter gis det anbefaling av poenggivning for vurdering av figurer og dataprogramvurdering, for denne vurderingen gjøres for hele besvarelsen samlet. Dette dokumentet er skrevet av Arnt Inge Vistnes 5. og 6. mai 2012.

### Del 1:

#### *Respons til en mekanisk fjærpendedel under påvirkning av en mekanisk oscillerende kraft i en begrenset tidsperiode.*

I lærebokas kapittel 1 beskrives ”tvungne svingninger” for en situasjon at et system påvirkes av en oscillerende kraft som varer ved ”uendelig lenge”. I en slik situasjon kan vi definere en kvalitetsfaktor  $Q$  som eksperimentelt kan hentes ut av frekvensresponsen til systemet, definert som amplituden i annen potens plottet som funksjon av frekvensen til den påtrykte kraften. Amplituden må bestemmes etter at systemet har kommet i en stasjonær tilstand, dvs at amplituden ikke lenger endrer seg når tiden går (utslaget varierer harmonisk, men amplituden er konstant). Figur 1 viser frekvensresponsen til et slikt system.



Figur 1: Relativ energi (relativ amplitude kvadrert) for et system utsatt for tvungne svingninger. Dette er figur 1.13 i læreboka.

Deloppgave 1 går ut på å finne ut hva som skjer med et slikt system dersom den oscillerende kraften bare varer ved en kort tid. Nærmere bestemt skal vi bruke en kraft som matematisk kan beskrives som en gaussisk konvoluttering av en ren cosinussvingning (toppunkt midt i den gaussiske konvolutteringen):

$$F(t) = F_0 * \exp(-(t-t_0)^2/\sigma^2) * \cos(\omega (t-t_0))$$

der  $t_0$  er tiden kraften har sin maksimale verdi. Bredden på kraftpulsene er proporsjonal med  $\sigma$  (målt i tidsenheter). Det svingende systemet skal være i ro før kraften settes inn.

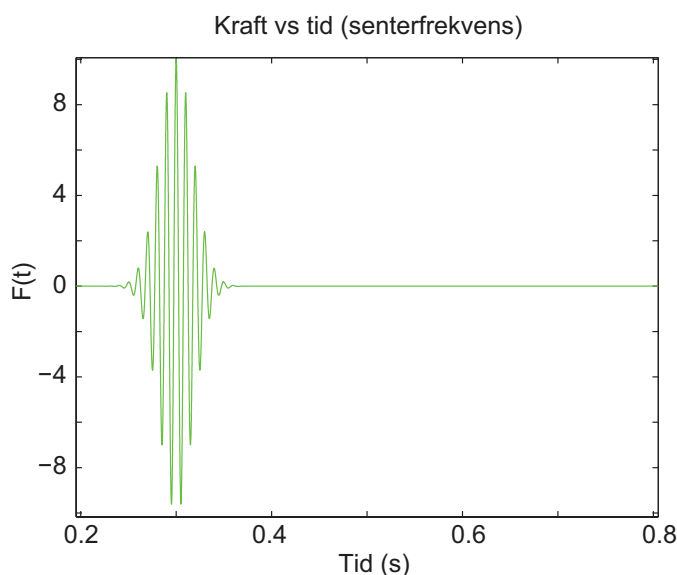
Matematisk sett kan vi finne ut hvordan systemet vil respondere på en slik kraft ved å bruke Newtons 2. lov. Den gir oss en differensiallikning, og den kan løses ved hjelp av numeriske metoder.

Jeg velger å bruke 4. ordens Runge-Kuttas metode, og tar utgangspunkt i det jeg gjorde i oblig C oppgave 4 og 5. Der tok jeg utgangspunkt i Matlab-programmer gitt i kapittel 2 i læreboka, nemlig hovedprogrammet "svingning12.m" sammen med "rk4\_2130.m", "fx.m" og "fv.m". Programmene "rk4\_2130.m", "fx.m" ble brukt uforandret, mens vi i fv.m fikk inn den aktuelle kraften ved å bruke koden:

```
Ft = param.Fmaxn*exp(-(tc-param.topp)*(tc-param.topp)/param. ...
sigma2)*sin(param.omegad*tc);
dvdt = -param.kn*xc - param.bn*vc + Ft;
```

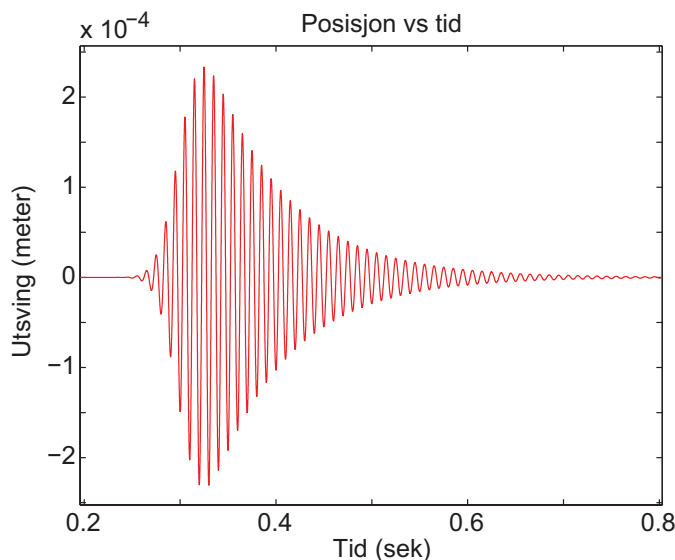
hvor jeg måtte utvide strukturen param for å få med tidspunktet for når kraften skulle ha sin maksimale verdi "topp", og "sigma2" som er kvadratet av sigma  $\sigma$  gitt i uttrykket for kraften. Listing for hovedprogrammet er gitt som vedlegg. Jeg bruket parametre som anbefalt i oppgaveteksten.

Figur 2 viser tidsbildet av kraften for det tilfellet at senterfrekvensen er 100 Hz og sigma er 0.025 s. Forløpet ser riktig ut siden avstanden mellom topppunktene er ca 10 ms som de burde være ved 100 Hz, og omhyllingskurven har en totalbredde (ved ca 1/e av maks verdi) på i størrelsesorden 50 ms (2 x sigma) slik det burde være.



Figur 2: Kraften  $F(t)$  for senterfrekvens 100 Hz og sigma lik 0.025 s. Utsnitt fra originalfigur.

Utslaget til det svingende systemet for dette tilfellet er gitt i figur 3:



Figur 3: Utslaget til systemet som følge av den påtrykte kraften gitt i figur 2. Utsnitt av originalfigur.

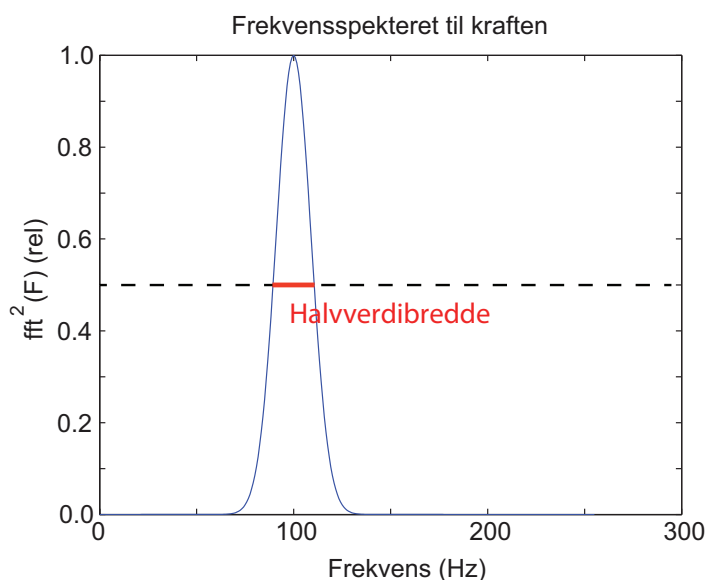
Vi ser at utslaget kommer noe senere enn kraften, stiger omtrent på samme måte som kraften, men når kraften dør ut, har systemet svingenergi til overs og fortsetter som en ”dempet svingning” med en frekvens lik systemets egenfrekvens (samme som påtrykt frekvens i dette tilfellet).

For mange av de andre sigmaverdiene sank utslaget omtrent like raskt som kraften avtok, slik at formen på utslag vs tid ble nokså likt formen på kraften vs tid, bare at responsen (utslaget) kom litt etter den påtrykte kraften.

Jeg kunne godt hatt med to tilsvarende figurer som figur 2 og 3 for å vise dette, men har droppet det her.

Fouriertransformerer vi  $F(t)$ , og tar absoluttverdien av resultatet, og dernest kvadrerer hver enkelt fourierkoeffisient, får vi resultatet vis i figur 4. Absoluttverdien av den fouriertransformerte til  $F(t)$  har en gaussisk form.

Halvverdbredden til  $(\text{abs}(\text{fft}(F(t))))^2$  er en av parametrene vi skal bruke i denne deloppgaven. Det viser seg at denne ”*halvverdbredden av frekvensspekteret til F*” varierer når sigma endres. Det er et inverst forhold mellom disse, det vil si at dersom sigma øker til det dobbelte, avtar halvverdbredden til frekvensspekteret til F til halvparten.



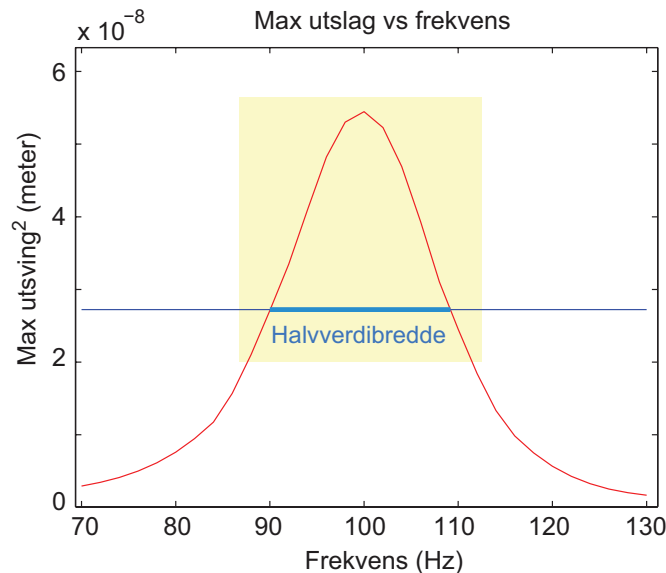
Figur 4: Frekvensspekteret til kraften  $F(t)$  for senterfrekvens 100 Hz og sigma lik 0.025 s.

Halvverdbreddene ble lest av manuelt ved å zoome svært kraftig inn i originalplot og lese av frekvens for kryssningspunktene med linjen som markerte halve verdien av toppunktet.

## Frekvensresponsen til systemet

I deloppgave 1 skulle vi bruke beregninger som angitt ovenfor, for å kartlegge hvordan systemet responderte på krefter med ulik (senter)frekvens. På en måte ville vi lage diagrammer liknende det i figur 1, men for forskjellige varigheter for kraften (dvs ulike sigma-verdier).

I dataprogrammet la jeg da inn en løkke som kjørte beregningene for 31 ulike frekvenser fordelt på begge sider av resonansfrekvensen (eller riktigere sagt, frekvenser jevnt fordelt på begge sider av 100 Hz). For hver frekvens fant jeg maksimalt utslag til systemet ( $\max(x)$ -kommandoen i Matlab), og verdien ble kvadrert og lagret i en array. Etter løkken var ferdig, kunne jeg så plote ut ”frekvensresponsen til systemet”. Et eksempel på et slikt resultat er vist i figur 5.



Figur 5: Frekvensresponsen til systemet for sigma lik 0.025 s.

Figuren kunne nok med fordel markert de beregnede punktene, men så lenge kurven er temmelig glatt i det partiet vi skal lese av halvverdibredden, er det en indikasjon på at vi har tett nok med punkter her.

I figuren har jeg variert frekvensen så mye at jeg har fått med meg frekvensresponskurven ut til der responsen er liten i forhold til maksimumsverdien. En slik kurve er fin for å se at alt fungerer som det skal, men er litt uheldig valgt når halvverdibredden skal bestemmes. Det ville vært bedre å bruke et frekvensvariasjonsområde som bare var halvparten av det vi har her. Da ville vi fått bedre definert halvverdibredden fordi de beregnede punktene ville vært mer finmasket når vi skulle bestemme av halvverdibredde. Vi trenger bare å variere frekvenser så mye at vi dekker den gulmarkerte delen av kurven. For å få til dette, bør frekvensområdet endres etter som sigma endres.

Vi må også endre total tid vi lar beregningene gå over og tidspunkt for når kraften skal ha sin maksimale verdi. Dette er nødvendig for at kraften og responsen til systemet skal utvikle seg fra en relativt svært liten verdi til maksimum og klart ha begynt å synke igjen innenfor den tiden beregningene går over.

Det er også av en annen grunn viktig å øke tiden for beskrivelsen når kraften virker lang tid (stor sigma). Oppløsningen i frekvensspekteret av kraften er  $1/T$ . Når den fouriertransformerte til kraften blir ganske smal, må  $T$  være stor for at vi skal få definert frekvensspekteret med rimelig god nøyaktighet. Ellers leser vi av alt for grove tall fra grafen.

Tabell 1: Parametra brukt i beregningene og halvverdibredder bestemt.

sigma	# perioder	total tid (s)	toppkt (s)	Rel. f-var	$\Delta f$ , syst (Hz)	$\Delta f$ , fft(F) (Hz)
0.00625	60	0.6	0.3	0.8	65.15	59.99
0.0125	60	0.6	0.3	0.5	34.59	29.98
0.025	120	1.2	0.5	0.3	19.125	14.994
0.05	120	1.2	0.5	0.15	11.138	7.514
0.1	240	2.4	0.5	0.15	7.119	3.763
0.2	240	2.4	0.5	0.1	5.161	1.895
0.4	480	4.8	1.0	0.07	4.375	0.949
1.0	960	9.6	2.5	0.07	4.088	0.376

Tabell 1 viser hvordan parametre ble variert for de ulike kjøringene slik at jeg fikk rimelig god bestemmelse av de to halvverdibreddene.

Vi ser av resultatene at når kraften varer lenger og lenger tid, blir bredden på frekvensspekteret til kraften tilsvarende kortere. Produktet av sigma og halvverdibredde er konstant.

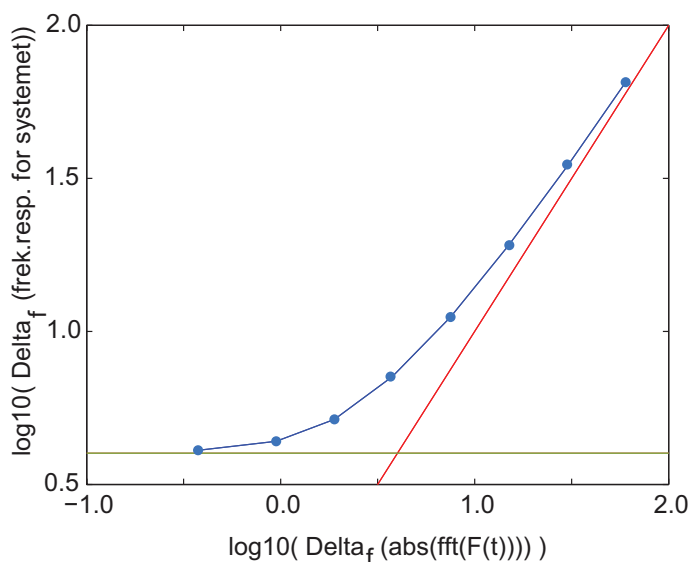
Slik er det ikke med halvverdibredde til systemet. Når kraften virker lenger og lenger tid, går halvverdibredde til en grenseverdi som synes å ligge nær 4.0. Dette er som forventet, for når kraften virker lenger og lenger tid, skal vi forvente å få samme frekvensrespons som vist i figur 1 som gjaldt for tilfellet at kraften virker uendelig lenge. Beregner vi Q-verdien i dette tilfellet, kan vi bruke relasjonen gitt i lærebokas kapittel 1 (ligning (1.34)):

$$Q = \sqrt{m \cdot k} / b$$

finder vi at  $Q = 25$ . Når vi videre vet at for dette tilfellet er  $Q = f_0 / \Delta f$ , og resonansfrekvensen er 100 Hz, følger det at  $\Delta f = 4.0$  Hz for det tilfellet at kraften virker "uendelig lenge".

Når vi derimot reduserer tiden kraften virker, øker halvverdibredde til frekvensresponsen til systemet dramatisk. De to halvverdibreddene nærmer seg imidlertid hverandre, mer responsen til systemet noe bredere enn halvverdibredde til kraften alene.

Det kan være instruktivt å plote de to halvverdibreddene mot hverandre. Siden de ulike sigmaene stort sett har en logaritmisk fordeling (økning med stort sett en faktor 2.0 for hver ny verdi), er det naturlig å velge et log-log-plot. Ellers ville dataene med de minste halvverdibreddene ligge alt for tett på hverandre, og vi kunne gå glipp av å oppdage den interessante platåverdien som forbinder våre resultater med tradisjonelle tvungne svingninger resultater slik de er beskrevet i læreboka.



Figur 6: Halvverdibredder til frekvensresponsen til systemet vs halvverdibredder til frekvensspekteret til kraften for de åtte verdiene av sigma som ble benyttet. Høyeste halvverdibredde svarer til minste sigma-verdi. Det vil si at punktene til venstre i diagrammet svarer til at kraften har vart lenge. Se teksten for andre detaljer.

Resultatet er figur 6. Her er det også tegnet inn en rød linje som svarer til at de to halvverdibreddene er lik hverandre. Vi ser at for store halvverdibredder synes vi å nærme oss nettopp en slik sammenheng. I figuren er også tegnet inn en horisontal grønn linje som svarer til halvverdibredde for frekvensresponsen til systemet når kraften virker "uendelig lenge". Vi ser at den blå kurven nærmer seg denne linjen for små halvverdibredder (langvarig kraft).

Vi ser av resultatene og kurven at bredden på frekvensresponsen til et system kan øke betraktelig dersom kraften virker bare en kort tid. Når en kraft virker en kort tid, kan vi si at ”frekvensen til kraften er dårlig definert”, noe som kommer fram i halvverdibredden til frekvensspekteret til kraften.

Dette kan vi forstå fysisk slik: Dersom vi dytter på et svingende system med en oscillerende kraft, vil systemet omtrent like mye dersom kraften vi bruker har resonansfrekvensen eller om den har en litt annen frekvens, så lenge kraften varer så kort tid at systemet (dersom det svingte med resonansfrekvensen) ikke rakk å komme i motfase med kraftvariasjonen. Dersom kraften virker kortere og kortere tid, kan frekvensen være lenger og lenger fra resonansfrekvensen før vi kan få en tenkt motfase mellom egensvingning og kraft.

Deloppgave 2 minner oss også om at Q-verdier bare er definert for det tilfellet at kraften virker ”uendelig lenge”.

I kapittel 1 drøftet vi kort hvor lenge kraften må virke før amplituden til svingningene blir tilnærmet konstant. Fra ligning (1.37) i læreboka vet vi at et svingende system bruker en tid

$$\Delta t = Q/\omega$$

for å nå 1/e av opprinnelig amplitude etter at systemet var satt i svingning og ingen påtrykt kraft virker lenger. Vi så at systemet stort sett brukte omtrent denne tiden for å nå stabil amplitude etter at man starter med en påtrykt oscillerende kraft med konstant amplitude.

Det kan være interessant å se hvor stor denne tiden er med varigheten til kraften vi brukte. Jeg har regnet ut  $\Delta t$  ut fra parametrene som er gitt, og fant  $\Delta t = 0.04$  s.

Vi fant at vi måtte ha en sigma-verdi om lag 0.2 før halvverdibredden til frekvensresponsen til systemet nærmer seg 4.0. Dette er fem ganger lenger enn  $\Delta t$ -verdien vi regnet ut i stad. Forskjellen antas å skyldes at selv om sigma er 0.2, er tiden betraktelig kortere for den perioden at den påtrykte kraften er omtrent like stor som maksimalverdien. Det synes derfor ikke å være noen åpenbar konflikt mellom våre resultater og det vi kjenner til for et system der den påtrykte oscillerende kraften varer ved ”uendelig lenge”.

[Drøfting av våre resultater vs kjent teori er viktig siden det alltid er en fare for at våre beregninger basert på numeriske metoder, kan være feil. Ser vi at våre resultater er i rimelig god overensstemmelse med kjent teori der våre resultater nærmer seg betingelser som ligger bak teorien, gir det et visst håp om at beregningene våre ikke har opplagte feil.]

## Poengsetting for deloppgave 1.

Som nevnt tidligere vurderes kvalitet på figurer og dataprogrammer samlet til slutt i vår vurdering. Her kommer mer faglige vurderinger ellers:

Maksimalt oppnåelig poeng: 25

- Max 5 poeng for å ha klart å beregne kraften  $F(t)$  og plottet den, samt å ha beregnet frekvensspekteret til kraften og plottet denne slik vi har bedt om, og fått med seg at mer langvarig kraft gir smalere frekvensspekter. Det skal være korrekte frekvens eller vinkelfrekvensverdier langs x-aksen i frekvensspekter-plottene. Pass på at kandidaten ikke har blandet sammen frekvens og vinkelfrekvens.

- Max 5 poeng for å ha klart å beregne hvordan systemet responderer på kraften (at Runge-Kutta-rutinen fungerer ok).
- Max 5 poeng gis for god ryddighet og forklaringer på hvordan oppgaven er løst. Dersom man ikke har kommentert overhodet hvordan man har valgt frekvensområdet, tiden for maksimal kraft, og totaltid i beregningene, kan man her maks få 3 poeng.
- Max 5 poeng dersom man har satt beregningene inn i en god fysisk ramme.
- Max 5 poeng dersom man i drøfting av resultatene har fått fram de to asymptotiske tilnærmede sammenhenger mellom halvverdibreddene og drøftet årsaken til disse fysisk.

## *Del 2:*

### *Hvor stor diskriminasjonsevne mhp frekvensforskjeller har hørselen vår når vi lytter til lyder som har ulik varighet?*

Denne deloppgaven har litt til felles med deloppgave 1, siden vi nå skal anvende lyder som er bygget opp som gaussiske konvolutteringer av en ren cosinusfunksjon. Systemet som blir påvirket av lyden er vårt øre, der basillarmembranen kan modelleres som mange svingesystemer som har litt ulik resonansfrekvens langsetter membranen. Amplituden til svingningene på ulike deler av membranen blir detektert ved hjelp av en rekke følehår, og signalene sendes til hjernen for prosessering og gir oss så vår opplevelse av lyden.

Vi måtte generere kraften selv, og laget da lyder med en valgt senterfrekvens og en varighet gitt ved sigma på liknende måte som i del oppgave 1. Resultatet er et signal som kan avspilles og som da gir det jeg her vil kalle en ”lydpuls”.

I denne oppgaven var det lagt opp til at vi skulle lage en lyd på 2.0 sekunder der første halvpart ga en lydpuls sentrert ved 0.5 s med en valgt frekvens, mens siste halvpart ga neste lydpuls med sin maksimalverdi ved 1.5 s. Den siste lydpuksen skal ha samme frekvens som den første, eller en litt forskjellig frekvens, men verken forsøkspersonen eller noen andre personer skal vite om det er det ene eller det andre (dobbelt blind). Jeg brukte `rand()`-funksjonen i Matlab for å sikre meg vilkårlighet i lydene som ble presentert for forsøkspersonen.

Det ble gjennomført ti tester på om forsøkspersonen oppfattet lydene i lydparet som forskjellig eller ikke, og sammenligning med en ”fasit” som ble skrevet ut til skjermen til sist, kunne vi avgjøre om vi faktisk kunne høre forskjellen i frekvens eller ikke. Vi krevde minst åtte av ti korrekte svar for å hevde at vi hørte frekvensforskjellen.

Et dataprogram skrevet i Matlab ble utviklet, og dette er gjengitt i vedlegg 2.

Oppgaven gikk så ut på å finne minste frekvensforskjell som måtte til for å høre forskjeller på lydene i et lydpar, for en rekke ulike varigheter på lydpuksene. Jeg startet med en lett hørbar frekvensforskjell og reduserte frekvensforskjellen inntil jeg ikke lenger kunne høre forskjeller (med åtte av ti riktige tester). Syv ulike varigheter på lydpuksene skulle testes, svarende til følgende sigma-verdier:  $\sigma = 0.4, 0.2, 0.1, 0.05, 0.025, 0.0125, 0.006$  s. Hele denne sekvensen skulle gjentas for (minst) to ulike senterfrekvenser, og de aktuelle verdiene som var oppgitt var: 100 Hz, 500 Hz, 2 kHz og 6 kHz.

Resultater fra forsøkene er vist i tabell 2, og jeg har bare tatt med resultater for 100 Hz. Vi ser at evnen til å diskriminere mellom to nærliggende tonehøyder (frekvenser) varierer langt mindre med varigheten til lydpuksene enn det vi skulle trodd ut fra resultatene i deloppgave 1. Det er nesten ingen forandring i frekvensforskjeller før lydpuksene blir meget kortvarige.



Tabell 2: Nødvendig forskjell i tonehøyde (frekvens) for at to etterfølgende lydimpulser skal oppfattes som forskjellige. Frekvensen til referanselydimpulsen var 100 Hz. Det ble bare testet for frekvensendringer på 1.0 Hz. Usikkerheten er om lag 1 Hz for de seks første sigmaverdiene, men minst 2 Hz for tilfellet at lydimpulsene varte kortest. For diskusjon av siste kolonne, se teksten.

$\sigma$ (s)	$\Delta f$ hørbar (Hz)	$\sigma \Delta f$
0.4	5	2.0
0.2	4	0.8
0.1	5	0.5
0.05	6	0.3
0.025	6	0.15
0.0125	8	0.10
0.006	20	0.12

Vi står nå overfor et dilemma. Hvordan skal disse resultatene forstås? Vi ser at varigheten til lyden ikke har noe klar betydning for minste frekvensforskjell som skal til for å høre forskjell i tonehøyde (frekvens). I alle fall ikke for lydimpulser med  $\sigma$  større enn ca 25 ms.

For de aller korteste lydimpulsene er det imidlertid annerledes. Der synes det som vi nærmer oss en situasjon der frekvensdiskrimineringen blir markant dårligere når pulslengden reduseres. Vi har i tabell 2 beregnet produktet  $\sigma \Delta f$ . Vi ser at for tre minste  $\sigma$ -verdiene er produktet omtrent uforandret. Dette minner oss om den vanlige relasjonen mellom bredden til en bølgepakke og bredden til frekvensspekteret til bølgepakken, slik vi så det f.eks. for kraften i deloppgave 1.

Normalt ville jeg imidlertid trodd at  $\sigma \Delta f$  burde nærme seg en grense på ca 1, og ikke ca 0.1 slik vi ser i våre resultater.

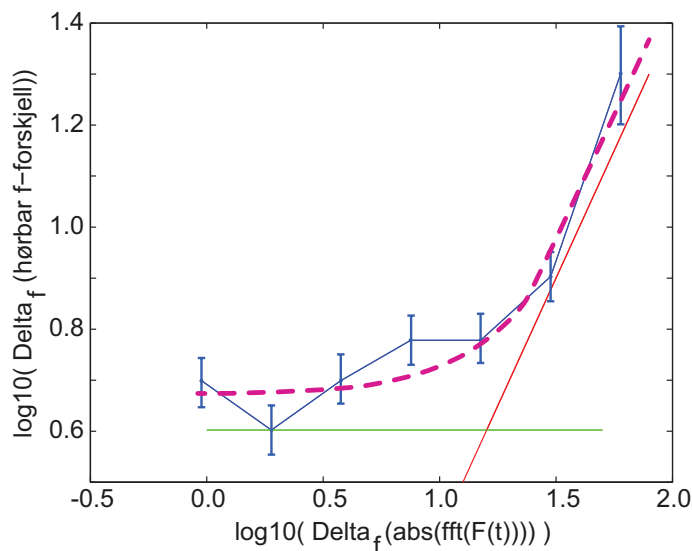
En relasjon  $\Delta t \Delta f$  større eller lik 1 er imidlertid helt avhengig av hvordan  $\Delta$  beregnes. I tabell 2 har vi rett og slett brukt  $\sigma \Delta f$ , og halvverdbredden på lydimpulsen er noe lengre enn  $\sigma$ . Dessuten er det ikke nødvendigvis slik at  $\Delta f$  egentlig representerer halvverdbredde i en frekvensrespons på en liknende måte som vi tidligere har definert denne. Dessuten vet vi at når vi bruker statistiske mål for "usikkerhet" (standardavvik), kan produktet  $\Delta t \Delta f$  faktisk komme ned til  $1/2\pi = 0.16$ . Dette er en verdi som ikke er svært forskjellig fra det vi har funnet for de korteste  $\sigma$ -veridene i tabell 2.

Det er imidlertid en mulighet for at vi kan høre forskjeller i tonehøyde bedre enn det vi skulle forvente ut fra en "Heisenberglignende" relasjon  $\Delta t \Delta f$  større eller lik 1. Svingningene i basillarmembranen må følge fysiske lover og vil ha en oppførsel som vil følge de sammenhengene vi så i deloppgave 1. Det er imidlertid parallell prosessering av informasjonen fra følehårene som registrerer hvor mye membranen svinger i ulike posisjoner. Denne parallell-prosesseringen gjør det mulig for hjernen å bestemme toppunktets plassering bedre enn halvverdbredden til hele frekvensresponsen. Jeg har derfor en hypotese at hørselen vår, på grunn av parallellprosessering og bearbeiding av data i hjernen, kan oppnå en frekvensdiskriminering i visse situasjoner som er bedre enn hva vi kunne forvente ut fra  $\Delta t \Delta f$  - produkter.

Resultatene våre gir oss imidlertid også en annen interessant informasjon, nemlig den at diskriminasjonsevnen for ulike frekvenser er temmelig uforandret for lydimpulser som varer lenger enn 25 ms. Hva minner dette oss om?

Husk ved bedømming av besvarelser: I deloppgave 2 skal man gjøre en kartlegging for (minst) TO senterfrekvenser. Her er det bare tatt med resultat for EN.





Figur 7: Min evne til å høre frekvensforskjeller vs halvverdibredder til frekvensspekteret til lydimpulsen for de syv verdiene av  $\sigma$  som ble benyttet. Se teksten for andre detaljer.

I figur 7 har vi tegnet et liknende diagram som i figur 6 i forrige deloppgave. Vi har brukt halvverdibredder i frekvensspekteret til lydimpulsen ("kraften") og sammenligner disse med min evne til å høre frekvensforskjeller. Det var overraskende å se at denne sammenstillingen har klare trekk liknende de vi fant for det rent mekaniske systemet i deloppgave 1. Det er imidlertid en betydelig usikkerhet i minste  $\Delta f$  som er hørbar slik at kurven vi får direkte ut fra tabell 2 blir ganske "buklete".

Jeg har valgt å tegne inn et estimat av usikkerheten samt en "glattet kurve" (stiplet fiolett kurve) i samme diagrammet. Den stiplete kurven følger prinsipielt det samme forløpet som det vi fant for det mekaniske systemet. Tilfeldigvis har vi samme senterfrekvens 100 Hz, og vi har tilnærmet samme grenseverdi (ca 4 Hz) for  $\Delta f$  når lydimpulsen (kraften) varer lenge nok. Det betyr at øret ved denne frekvensen synes å ha en Q-verdi om lag 25 for langvarig ensartet harmonisk lyd.

Det er forøvrig en annen interessant observasjon som kan gjøres ut fra forsøket jeg gjorde ved 100 Hz ren sinus. Jeg klarte bare å skille 100 Hz fra en lyd på ca 104 til 105 Hz. Imidlertid klarer jeg når jeg lytter til et piano, lett høre forskjell på to halvtoner som ligger like etter hverandre og har frekvens ca 100 Hz. Denne forskjellen kan jeg ikke forklare på annet vis enn at de harmoniske også blir brukt når vi bedømmer tonehøyder til ulike instrumenter. Vår lyd hadde i prinsippet ingen overtoner.

## Poengsetting for deloppgave 2.

Som nevnt tidligere vurderes kvalitet på figurer og dataprogrammer samlet til slutt i vår vurdering. Her kommer mer faglige vurderinger ellers:

Maksimalt oppnåelig poeng: 20

- Max 5 poeng for å ha klart å generere lydimpulser slik det er foreskrevet, med opplegg for dobbelt blind kjøring. Pass på at kandidaten ikke har blandet sammen frekvens og vinkelfrekvens.
- Max 7 poeng for gode resultater ved to ulike referanse-tonehøyder (frekvenser). Har kandidaten virkelig endret frekvensen helt til han/hun ikke lenger hører forskjeller i tonehøyde (frekvenser)? Er det gitt omtrentlig hvor store steg man har brukt slik at vi får et visst inntrykk av hvor stor

usikkerhet det er i resultatene?

- Max 3 poeng gis for god ryddighet og forklaringer på hvordan oppgaven er løst og presentasjon av resultater..
- Max 5 poeng dersom man har gitt en brukbar drøfting av resultatene. Det er ikke nødvendig å ha fått fram de to asymptotiske tilnærmede sammenhenger gitt i figur 7, men man må ha gjort et hederlig forsøk på å trekke lærdom ut av resultatene og gjerne komme med en hypotese for mulige sammenhenger.

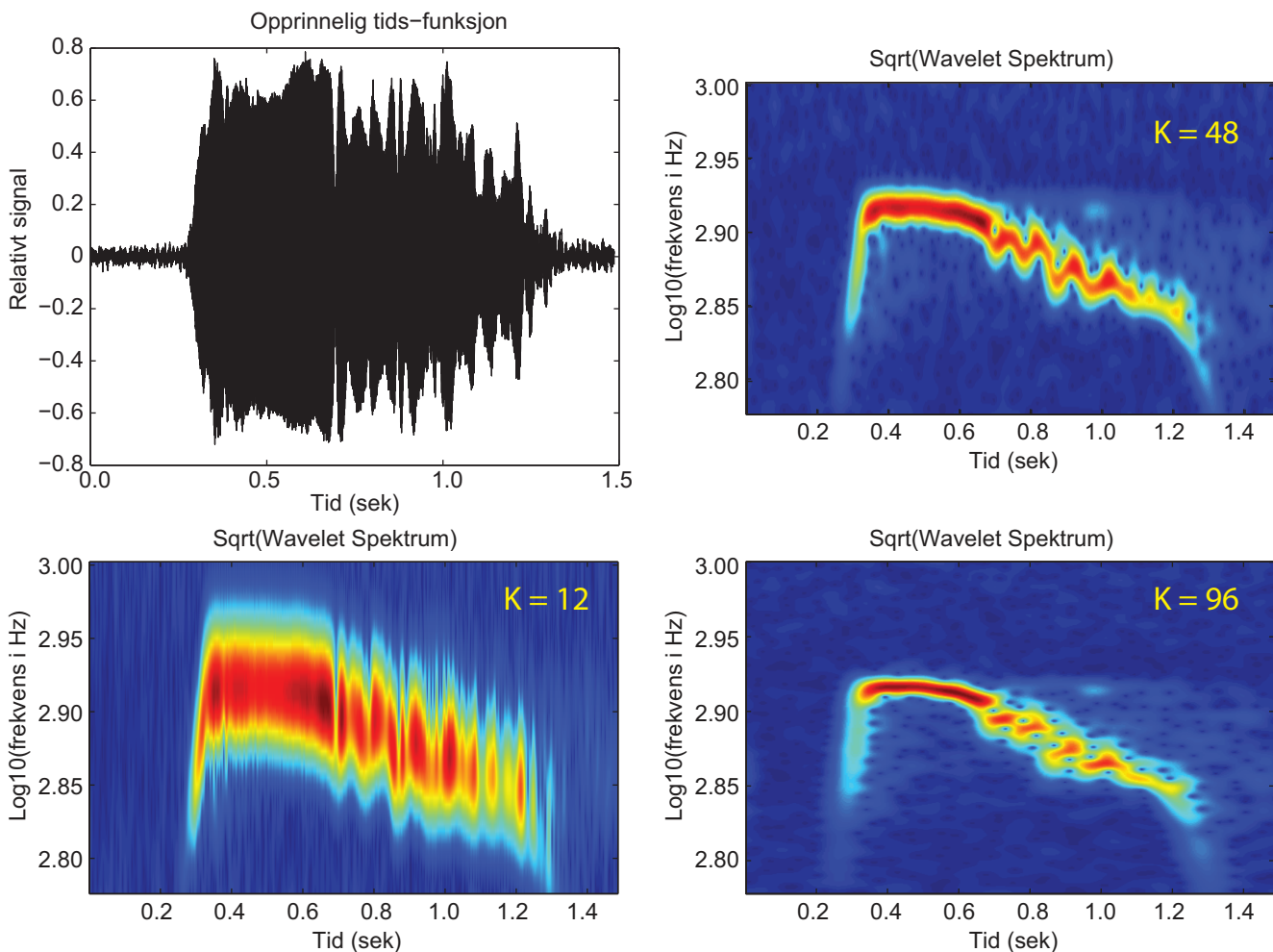
### Del 3:

## Bli kjent med wavelettransformasjon og hvordan parametre kan optimaliseres.

I denne deloppgaven brukte jeg det programmet for wavelettransformasjon som er gitt sist i lærebokas 13. kapittel. Jeg har bare gjort små endringer, og har derfor ikke lagt ved listing av dette programmet sist i denne rapporten.

### 3.1 Analyse av Kattugle3.wav-lyden

Det står at vi skal bruke  $2^{18}$  punkter, hvilket innebærer at vi får med oss begge Uh-hu-lydene. Jeg har likevel valgt å bare ta med første del, for å korte ned på kjøretid, og ikke minst for å redusere filstørrelser brukt i denne "fasiten".



Figur 8: Optimalisering av bølgetallsparameteren  $K$ . Se tekst for detaljer.

Først skal vi optimalisere K-parameteren. I dette tilfellet er vi ikke spesielt interessert i de harmoniske, og plukker derfor ut bare grunntonen for Uh-lyden. Frekvensen som undersøkes er fra 600 til 1000 Hz, og vi har bare brukt  $2^{16}$  datapunkter.

I figur 8 er det øverst vist tidsbildet av lyden, sammen med det wavelettransformerte signalet for  $K=30$ . I nedre del er det wavelettransformerte signalet gitt for  $K=12$  og  $K=96$ .

Vi ser at for små K-verdier ( $K=12$ ) får vi en tidsoppløsning som er meget god. Vi finner igjen intensitetsfordelinger vi ser i tidsbildet til lyden også i intensitetsvariasjoner vs tid i wavelettransformasjonen. Ulempen med så liten K-verdi er at frekvensbestemmelsen flyter mye ut (i vertikal retning i diagrammet).

For store K-verdier ( $K=96$ ) ser vi at frekvensoppløsningen er svært mye bedre enn for  $K=12$ , men nå flyter tidsinformasjon ut. Et optimalt valg for å beholde en god del tidsinformasjon samtidig som ikke frekvensen flyter mye ut, er K-verdier i området 30-48. Her er  $K=48$  plottet i øvre del av figur 8.

Den evig tilbakevendende konkurransen mellom presis tidsinformasjon og presis frekvensinformasjon som vi har sett eksempler på i deloppgave 1 og 2, dukker altså opp også i wavelettransformasjonen. Vi får ikke både i pose og sekk, og det må skjønnes til for å velge et kompromiss.

\*\*\*

I denne deloppgaven skulle vi også variere hvilken størrelse som ble vist i fargedigrammet, enten den wavelettransformerte direkte, kvadratroten av denne, eller kvadratet av denne. Hensikten er å vise at vi kan variere kontrasten i det visuelle bildet ved å endre på hva som blir presentert.

Vi må da identifisere hva som blir beregnet i det programmet jeg hentet fra kapittel 13 i læreboka. I hovedløkken for wavelettransformasjonen finner vi følgende kodesnutt:

```
% Loop over alle frekvenser som inngår i analysen
for jj = 1:M
    fktr = (K/f_analyse)*(K/f_analyse);
    ....
    WLdiagram(jj,:) = sqrt(abs(iff(FTwl.*transpose(FTsignal))));
    ....
    fbrukt(jj) = f_analyse;           % Lagrer frekvensene som faktisk er brukt
    f_analyse = f_analyse*ftrinn;    % Beregner neste frekvens
end;
```

Siden fjerner vi mange punkter i det originale diagrammet og sitter igjen med matrisen WLdiagram2 som plottes vha imagesc()-funksjonen. Det skjer ingen annen endring fra WLdiagram til WLdiagram2 annet enn at matrisens størrelse reduseres.

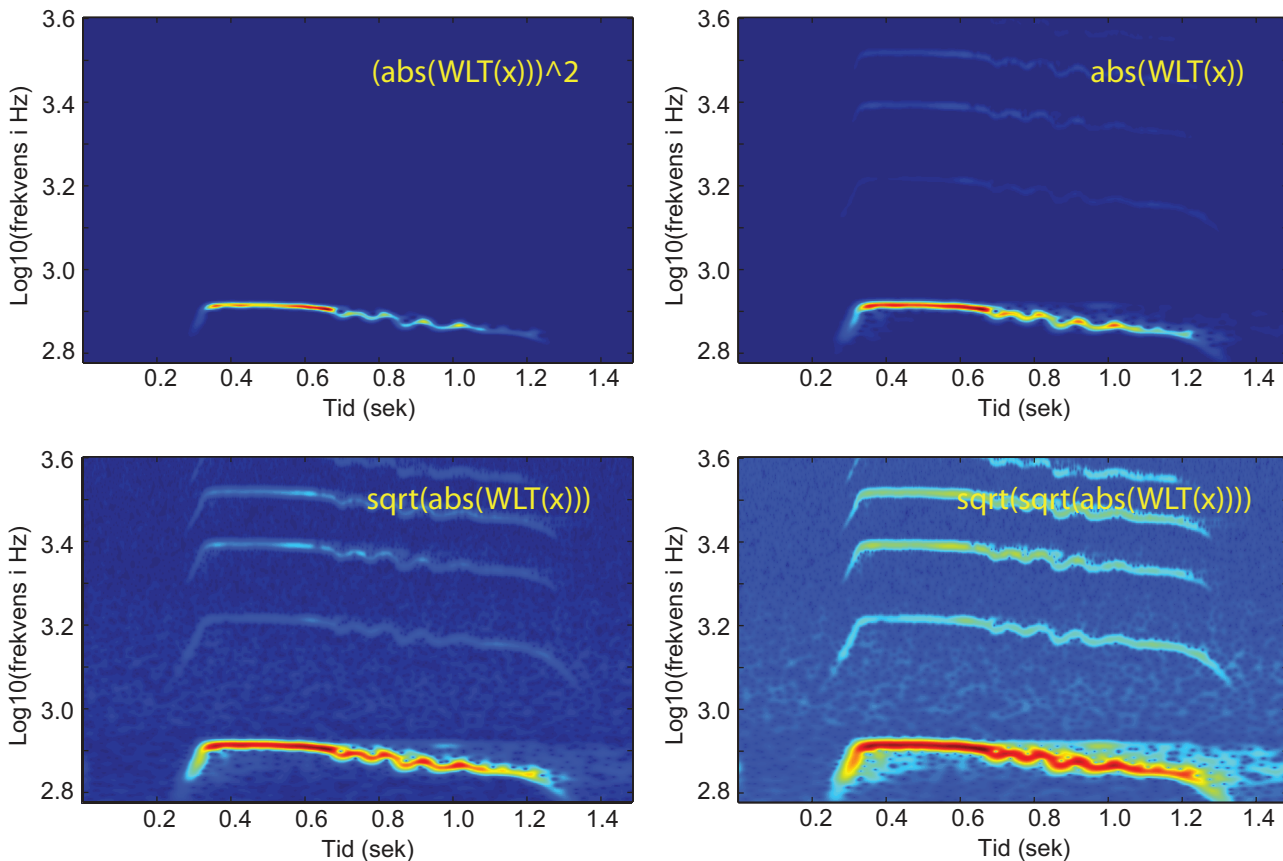
Vi ser at i koden fra læreboka bruker vi i utgangspunktet kvadratroten av absoluttverdien til den wavelettransformerte. Vi ble bedt om å også plote absoluttverdien av den wavelettransformerte og kvadratet av denne igjen. Den aktuelle koden i dataprogrammet ble endret på følgende måte i de to tilfellene:

```
WLdiagram(jj,:) = abs(iff(FTwl.*transpose(FTsignal)));
```

og

```
WLdiagram(jj,:) = abs(iff(FTwl.*transpose(FTsignal)));
WLdiagram(jj,:) = WLdiagram(jj,:).* WLdiagram(jj,:);
```

Jeg valgte å legge til også en fjerde variant, som er kvadratroten av kvadratroten. Alle disse eksemplene er vist i figur 9. Merk at i denne figuren har valgt å inkludere frekvensene 600 - 4000 Hz og brukt  $K=12$ .



Figur 9: Ulike presentasjonsformer for et wavelettransformert signal. Se tekst for detaljer.

Det er helt tydelig at kontrasten i diagrammet endrer seg temmelig dramatisk alt etter hvilken variant vi velger. Når vi plottet kvadratet av absoluttverdien til den wavelettransformerte (øverst til venstre i figur 9), forsvinner svake detaljer helt, mens de kraftigste detaljene blir desto mer fremhevet.

Ved å presentere absoluttverdien til den wavelettransformerte, får vi fram noen flere detaljer i de svakere partiene, og dette blir mer og mer uttalt når vi velger kvadratroten og fjerde roten (kvadratroten av kvadratroten).

Umiddelbart virker det som om fremstillingen basert på kvadratroten av absoluttverdien til den wavelettransformerte (nederst til venstre i figur 8) synes å være et godt valg for denne type signaler.

\*\*\*

Som siste del av denne deloppgaven skulle vi se på avstandene mellom de harmoniske i et waveletdiagram. Vi ser av figur 9 at det IKKE er samme avstand mellom de harmoniske, slik vi er vant til i et fourierspekter. Grunnen er at frekvensskalaen i et fourierspekter er lineær, mens den er logaritmisk i et waveletdiagram.

Frekvensene til de harmoniske er gitt ved et heltall ganger grunntonens frekvens  $f = n f_0$  hvor  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Vi tar logaritmen av dette uttrykket og får:

$$\log_{10}(f) = \log_{10}(f_0), \log_{10}(2) + \log_{10}(f_0), \log_{10}(3) + \log_{10}(f_0), \log_{10}(4) + \log_{10}(f_0), \dots$$

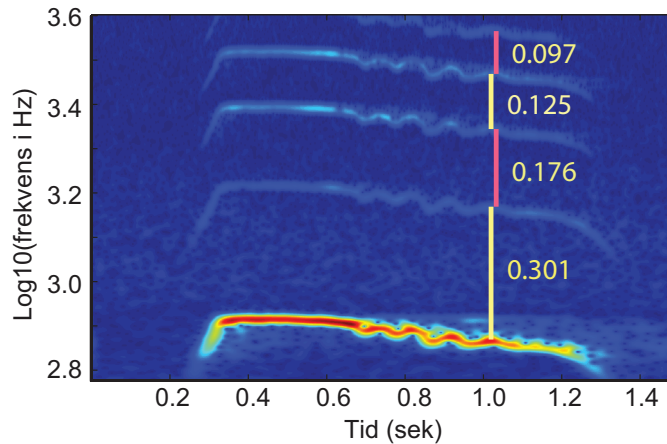
herav følger:

$$\log_{10}(f) = \log_{10}(f_0), 0.301 + \log_{10}(f_0), 0.477 + \log_{10}(f_0), 0.602 + \log_{10}(f_0), \dots$$

Eller dersom vi bare ser på avstanden mellom de harmoniske, blir disse som følger:

$$0.301, 0.176, 0.125, 0.097, 0.079, 0.069 \dots$$

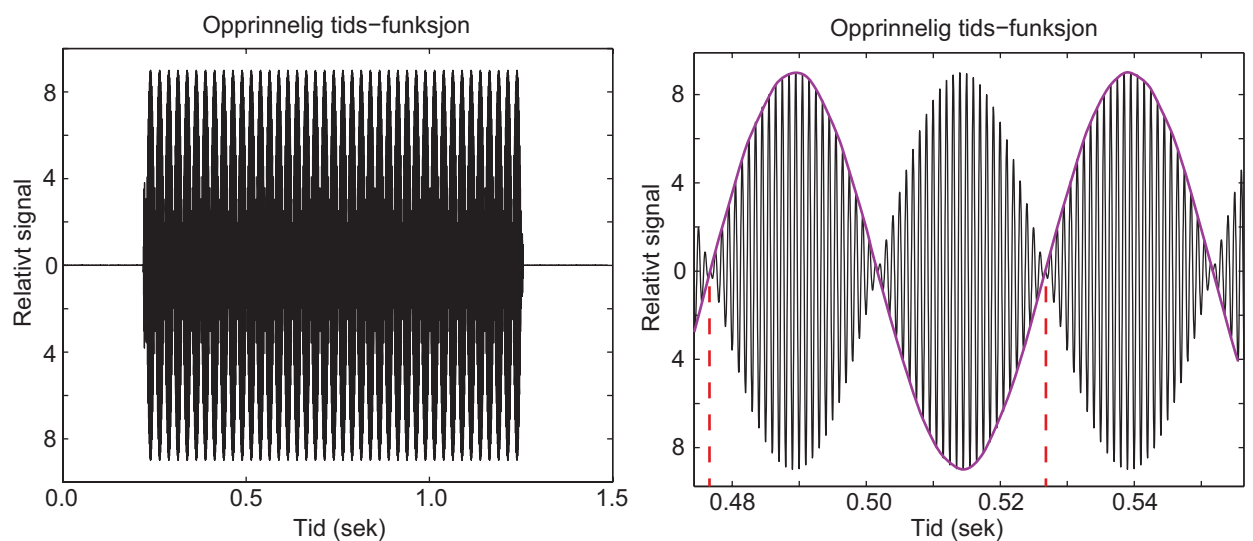
Jeg undersøkte om dette stemte med det vi observerer, og det gjør det faktisk, slik det er vist i figur 10.



Figur 10: Avstanden mellom de harmoniske er alltid den samme i en logaritmisk skala. Se tekst for detaljer.

### 3.2 Analyse av AM.wav-lyden

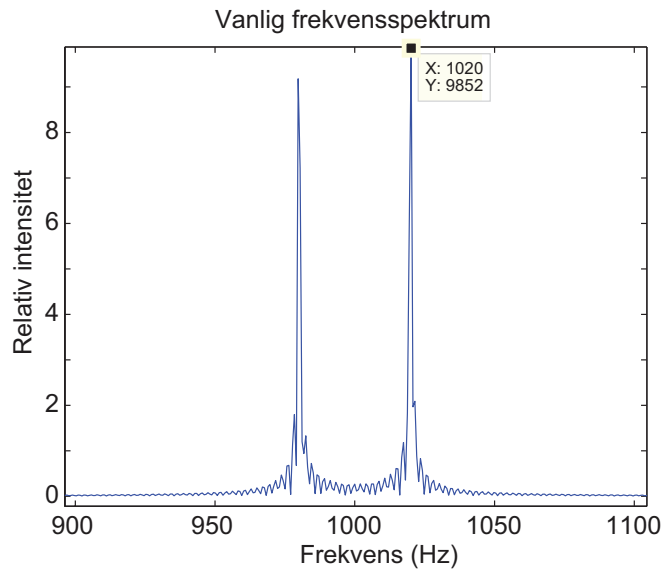
I dette tilfellet skulle vi analysere en matematisk generert lydfile. AM indikerer at signalet er ”amplitudemodulert”, og det ser vi også av analysen. Figur 11 viser tidsbildet av lyden. Det synes å være bare én basisfrekvens på signalet, men amplituden varierer på en sinusaktig måte. Vi ser allerede ut fra tidssignalet at frekvensen på den underliggende svingningen må være om lag 1000 Hz. Omhyllingskurven synes å ha en frekvens ca 20 Hz (siden periodetiden er ca 0.05 s ut fra de røde markeringene gitt i figurens høyre del). Legg merke til hvordan jeg da har skissert ”omhyllingskurven” i figur 11.



Figur 11: Tidsbildet av lydfilen AM.wav. Til venstre er det vist hele signalet der det er forskjellig fra null. I høyre del er det vist et utsnitt. Omhyllingskurve og periode er skissert.

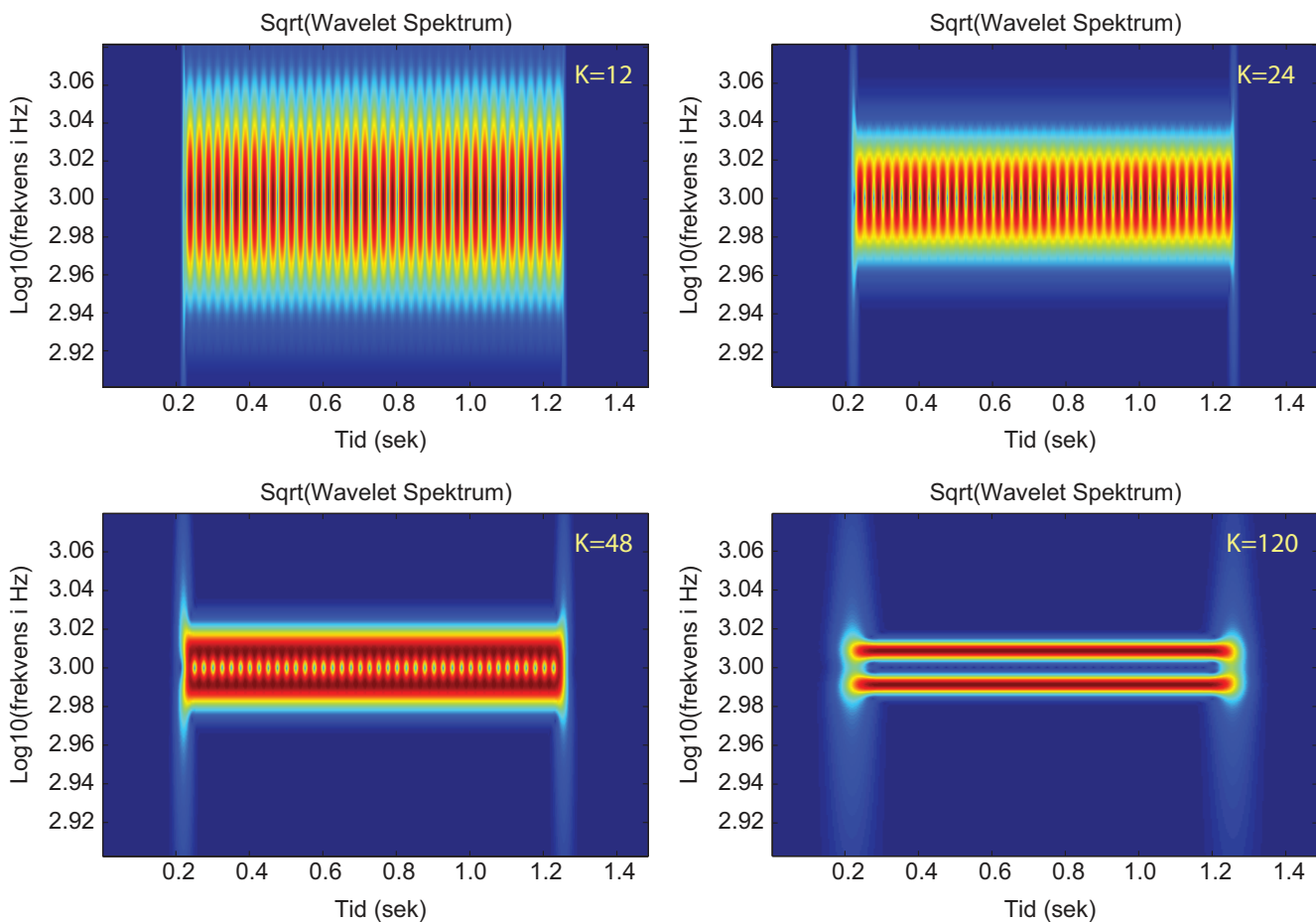
Det tilhørende frekvensspekteret er gitt i figur 12. Det består av to omtrent like intense linjer, den

ene ved 980 Hz og den andre ved 1020 Hz. Vi merker oss at det IKKE er noen linje ved 1000 Hz, selv om det i tidsbildet ser ut for at den underliggende frekvensen nettopp er 1000 Hz. Vi merker oss videre at frekvensen til omhyllingskurven nettopp er lik avstanden fra 1000 Hz til hver av de to linjene i frekvensspekteret.



Figur 12: Frekvensspekteret til lydfilen AM.wav. Jeg har bare tatt med et utsnitt i nærheten av der frekvensspekteret hadde en verdi klart forskjellig fra null.

Jeg gjennomførte så waveletanalyser av signalet for fire ulike K-verdier. Resultatet er vist i figur 13.



Figur 13: Waveletanalyse av lydfilen AM.wav for fire ulike bølgetallsparametre K.



Vi ser igjen at lav  $K$ -verdi ( $K=12$ ) fører til at vi har en god tidsoppløsning i waveletdiagrammet. De ulike intensitetstoppene i lyden kommer godt fram. Diagrammet viser imidlertid en elendig oppløsning i frekvens. Det kan synes som om det bare er en frekvens, men at frekvensen er dårlig definert.

Ved  $K=24$  har vi fortsatt tidsoppløsningen slik at vi ser de enkelte intensitetstoppene, mens frekvensdefinisjonen nå er bedre enn i stad. Fortsatt synes det som det er én bred frekvenstopp.

Når  $K=48$  begynner det å tegne seg at vi har to frekvenser. Vi ser rester etter tidsoppløsning av signalet, men den er nå nokså utydelig. Ved  $K=120$  har tidsinformasjonen om intensitetstoppene forsvunnet helt, men på den andre siden kommer det nå fram to nokså godt definerte frekvenser. Disse har nettopp frekvensene 980 og 1020 Hz, i tråd med hva vi fant i fourierspekteret.

Dette eksemplet viser på ny overgangen fra

*God tidsoppløsning - Frekvenser dårlig definert (liten  $K$ -verdi)*

til

*Dårlig tidsoppløsning - Frekvenser godt definert (stor  $K$ -verdi)*

Det er egentlig nokså lett å forstå matematikken bak signalet vi har brukt her. Frekvensspekteret tyder på at signalet kan skrives som en sum av to sinus (eller cosinus)-signaler, f.eks. slik:

$$x(t) = \sin(2 \pi f_1 t) + \sin(2 \pi f_2 t)$$

Fra Rottmann ser vi at dette kan skrives som:

$$x(t) = \sin(2 \pi (f_1+f_2)/2 t) \cdot \cos(2 \pi (f_1-f_2)/2 t)$$

Vi ser at dette i vårt tilfelle nettopp blir lik signalet:

$$x(t) = \sin(2 \pi (1000 \text{ Hz}) t) \cdot \cos(2 \pi (20 \text{ Hz}) t)$$

Dette er nettopp en sinusfunksjon med uforandret frekvens og amplitude, konvolutert at en cosinusfunksjon. Frekvens til omhyllingskurven er lik halve frekvensforskjellen mellom de to sinusene som vi også kan betrakte signalet som.

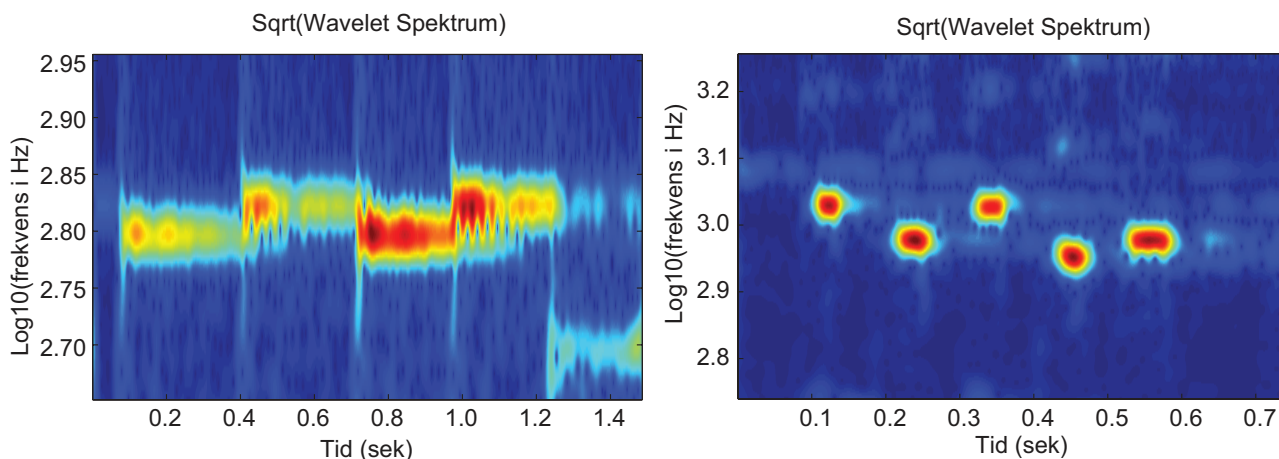
### 3.3 TilElise og midtsommernatt.wav-lydene

I denne deloppgaven skal vi analysere lyd fra et piano (i filen TilElise) og fra en tverrfløyte (i filen midtsommernatt(sdrøm)). Det er antydnet i oppgaveteksten at vi skal konsentrere oss om hvordan lyden starter, varer ved, og dør ut for disse to instrumentene.

Lydfilene er lange, og jeg plukker bare ut noen meget små biter av disse. Jeg vil i prinsippet bare se på én eller noen få toner fra hvert av instrumentene, og akkurat her er jeg ikke interessert i de harmoniske.

Jeg valgte ut lydsnutter slik: TilElise.wav: nstart 22500, npunkter 64 k, frekvens 450-900,  $K=20$ . For midtsommernatt.wav: nstart 26000, npunkter 32 k, frekvens 550-1800,  $K=24$ .





Figur 14: Waveletanalyse av bruddstykker av lydfilene TilElise.wav og midtsommernatt.wav. Parametre brukt er gitt i teksten.

Resultatet av waveletanalysen er gitt i figur 13. Vi ser helt tydelig følgende forskjeller mellom pianolyd og fløytelyd:

Starten på lyden er svært skarp for pianoet. Lydstyrken blir maksimal på ca 10 ms, mens for fløyten går det ca 20 ms før lyden har nådd nær maksimal amplitude. (Disse tallene kommer fra analyse av tidsbildet av signalet!)

For pianoet avtar lydstyrken mens tangenten holdes nede. For fløyten kan tonen ha samme intensitet i mange sekunder.

Lydstyrken fra pianoet avtar betydelig langsommere når tangenten slippes, enn lyden øker i styrke ved anslag. For fløyten synes det som om at lyden dør ut omtrent like raskt som den økte da tonen ble spilt.

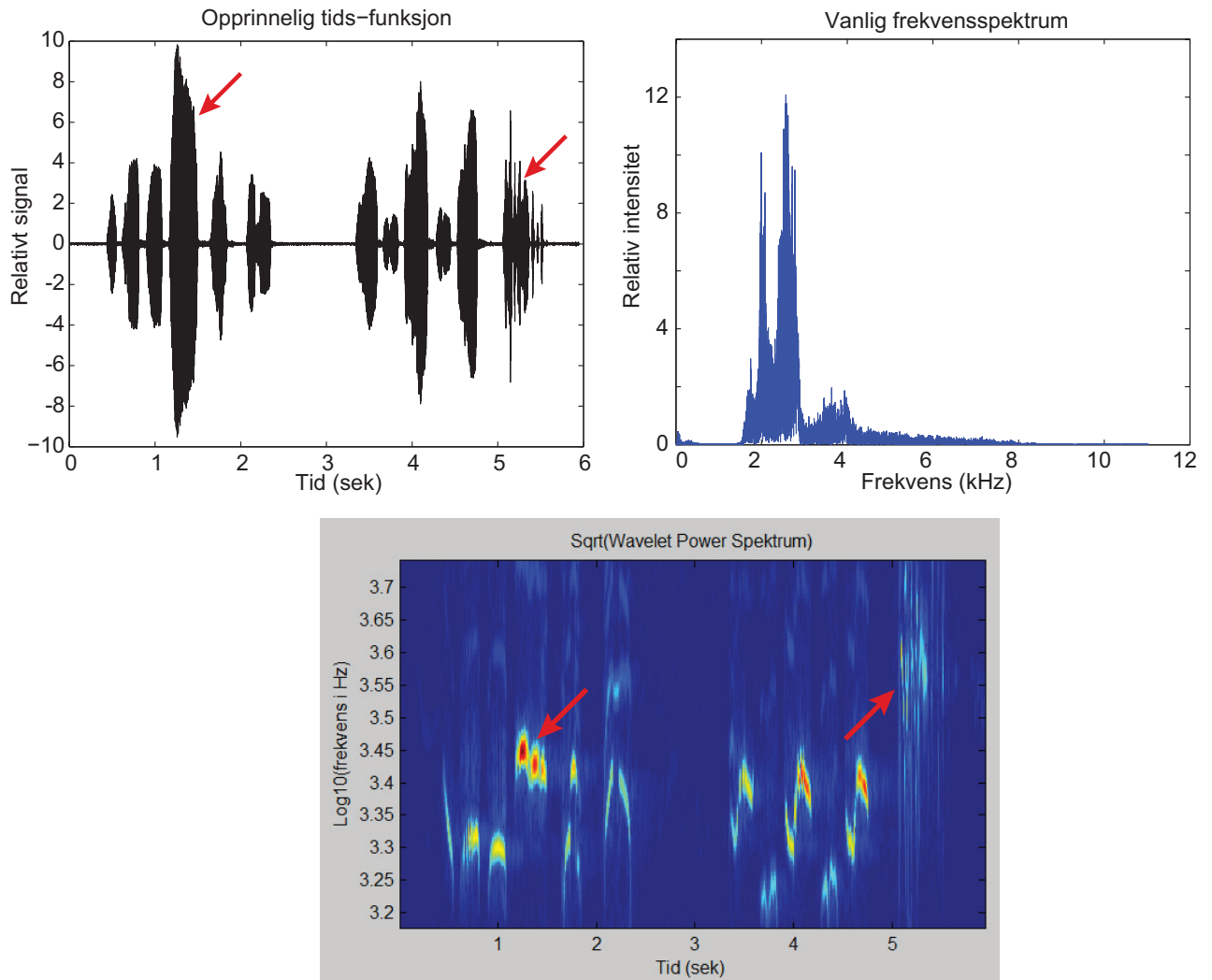
Waveletanalyse kan altså gi en del informasjon om hvordan en lyd starter, holdes ved like, og dør ut når vi f.eks. spiller på et piano. Det kan ikke frekvensanalyse ved fouriertransformasjon si noe om, siden tid ikke inngår i et fourierspektrum.

Det bør likevel bemerkes at dersom man har lyder hvor det bare spilles én tone om gangen, vil nok tidsbildet av signalet gi en vel så bra mål for hvordan tidsforløpene er. Selv med  $K=6$  vil vi ha en liten forbredning/utsmurning av tidsinformasjon sammenlignet med tidsbildet, skjønt det kan diskuteres (det er ikke lett å bestemme tidsutvikling på en skala der periodetiden for svingningene ikke er liten i forhold til stige/synketiden for amplitudevariasjoner.

### 3.4 Analyse av Svarttrost2.wav-lyden

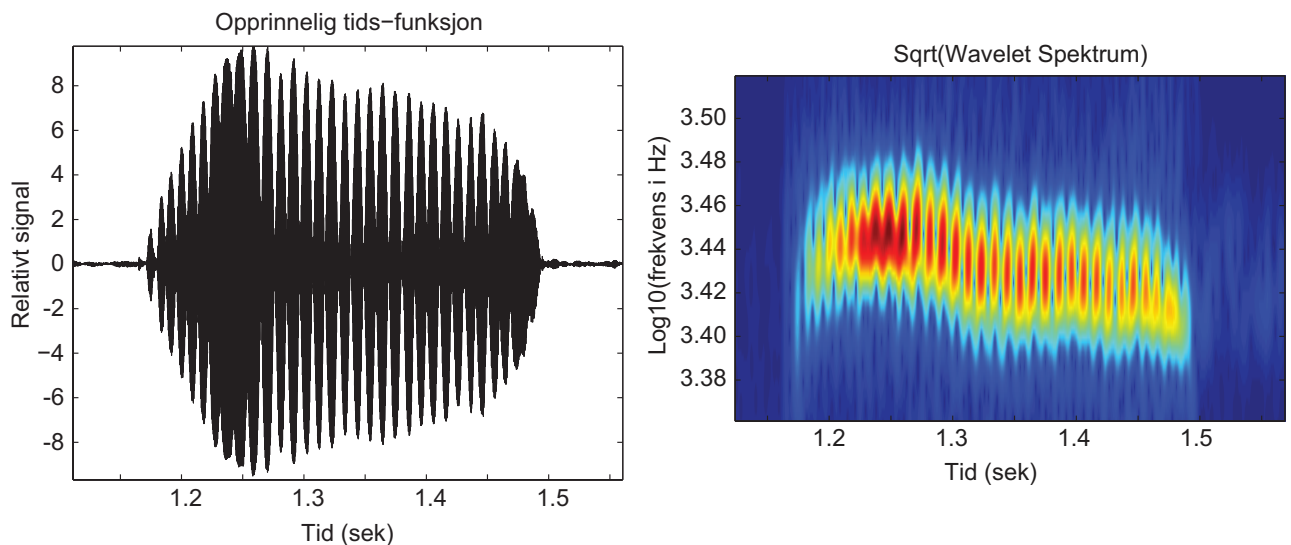
I den siste delen av deloppgave 3 skulle vi undersøke lyden fra svarttrostsang. Vi ble bedt om å finne fram til et parti i sangen hvor lyden ligner på AM-signalet vi hadde i 3.2. Videre ble vi bedt om å analysere et siste parti i lydsnutten Svarttrost2.wav.

Jeg startet ut med å få oversikt over lyden på denne file. Resultatet er vist i figur 15. Først er det gitt fuglelyden i tidsbildet. Det viser klart adskilte partier. Partiet merket med en rød pil til venstre, er et parti som fuglesangen ligner mye på AM-lyden i 3.2. Jeg har zoomet inn på dette området både i tidsbildet og waveletanalysen, og resultatet er gitt i figur 16. Det er klare oscilleringer i amplitude, og enda større grad av zoom i tidsbildet (ikke tatt med) viser detaljer tilsvarende høyre del av figur 11.



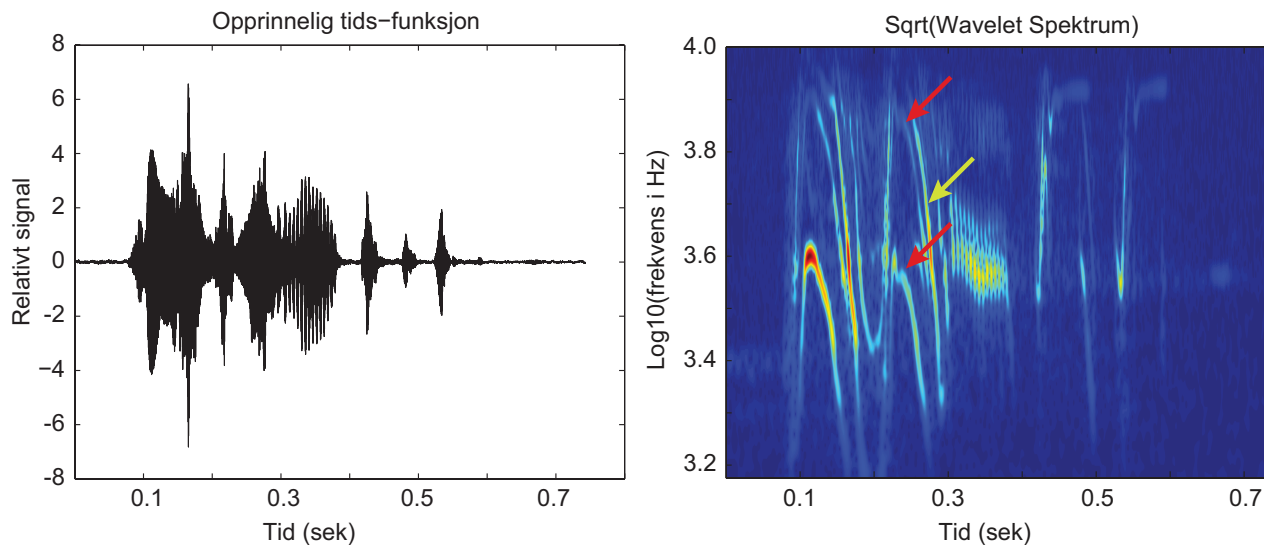
Figur 15: Tids- og frekvensbildet av lydfilen Svarttrost2.wav øverst, og den wavelettransformerte av signalet nederst. Se teksten for detaljer.

Fourierspekteret er temmelig uspesifikk, men viser aktivitet i hele området fra 1500 til og med 10000 Hz. Jeg valgte etter litt prøving og feiling 1500-5500 Hz som utgangspunkt for waveletanalysen gitt i nedre del av figur 15. I waveletanalysen er  $K=24$  brukt, fordi den gir en rimelig god tidsoppløsning.



Figur 16: Tids- og waveletanalyse av første markerte detalj i lydfilen Svarttrost2.wav. Vi ser at lydstyrken følger omtrent samme opplegg som i AM.wav-filen.  $K=24$  for å få detaljer i tid fram.

Jeg analyserte også den siste lydspirrivitten helt til høyre i tids- og waveletbildene i figur 15. Resultatet er vist i figur 17.



Figur 17: Tids- og waveletanalyse av siste markerte detalj i lydfilen Svarttrost2.wav.  $K=24$  for å få detaljer i tid fram. Se teksten for nærmere omtale.

Figur 17 viser et utrolig komplisert lydbilde. De røde pilene viser en grunntone og første over-tone. Den gule pile viser imidlertid en temmelig lærliggende tone som genereres samtidig med den rødmarkerte. Hvordan svarttrosten klarer å lage to nærliggende toner samtidig uten at de er harmoniske av hverandre forstår jeg ikke. Jeg innser i det minste at waveletanalyse er en utrolig slagkraftig metode for å analysere svingninger der frekvensen endrer seg mye med tiden.

### Poengsetting for deloppgave 3.

Som nevnt tidligere vurderes kvalitet på figurer og dataprogrammer samlet til slutt i vår vurdering. Her kommer mer faglige vurderinger ellers:

Maksimalt oppnåelig poeng: 25

- Max 9 poeng for 3.1 (3 poeng for hver av de tre delene) dersom kandidaten har fått vist de poengene vi var ute etter og har passe utsnitt i figurer og ok omtale av hva man har kommet fram til.
- Max 7 poeng for 3.2 dersom man har med plot som viser både tidsoppløsning og frekvensoppløsning i waveletdiagrammer, og dersom man også har litt tekst som går på vektlegging av tidsoppløsning vs frekvensoppløsning. Bør også ha med både tidsbilde og frekvensbilde og zoomet inn tilstrekkelig. Ett av poengene er reservert en matematisk sammenheng vist på side 15 i denne rapporten.
- Max 5 poeng for 3.3 dersom man har zoomet tilstrekkelig inn og diskuterer hvordan lyden tar til, vedvarer, og dør ut i de to tilfellene. Tidsangivelse er ikke nødvendig for full pott.
- Max 4 poeng for svarttrost, forutsatt at de fleste av figurene jeg har med i denne rapporten, med omtrent samme utsnitt, bør være med sammen med litt omtale, for å få full pott.

## *Del 4:*

### *Hvor mye oppfatter vi egentlig av et komplisert lydbilde?*

I denne deloppgaven hørte jeg først på en del lydfiler som inneholdt fuglesang fra en bokfink. Jeg lyttet først til en hel strofe, dernest til likeartede lyder innenfor den totale strofen, og i ett tilfelle kunne jeg lytte til bare en eneste detalj alene. Et underliggende spørsmål er om det er lettere å oppfatte detaljer når vi rendyrker en lyd detalj sammenlignet med å ha ulike detaljer tett etter hverandre.

Kommentarer til de ulike filene:

#### **bokfink1.wav**

Jeg hører at sangen går gjennom flere faser.

Første består av noen lyse kvitter, klarer ikke å høre om lyden går opp eller ned i frekvens.

Dernest kommer noen ekstra korte kvitter, igjen klarer jeg ikke å høre hva slags frekvensforandringer som foregår.

Så kommer relativt få lyder (3?) som er i mer ”langsom kino”, er temmelig kraftige, og har en klar frekvensforandring i seg. Det virker som om frekvensen stiger jevnt innenfor hver av disse korte snuttene.

Dernest kommer en litt ensartet lyd som varer ved noen tiendedels sekund uten at frekvensen endrer seg mye.

Sist kommer det en finale som består av tre lyder der første og siste har omtrent samme frekvens, mens den midterste har litt lavere frekvens.

#### **bokfink1A.wav**

Første fase alene består av ca seks like lydimpulser. Jeg klarer ikke å oppfatte om frekvensen går opp eller ned eller begge deler, men det er i alle fall en viss endring i frekvens innen hver del.

#### **bokfink1B.wav**

Andre fase alene består også av ca seks like lydimpulser. De kommer raskere på hverandre enn i første fase, og er mer kontante og ”harde” i lyden. Igjen klarer jeg ikke å oppfatte om frekvensen går opp eller ned eller begge deler.

#### **bokfink1C.wav**

Tredje fase alene består av fire like lydimpulser som er kraftige og utvikler seg saktere enn lydene i de to første fasene. Det er en klar forandring i frekvens innen hver del, men det er også her vanskelig å oppfatte om frekvensen går opp eller ned eller begge deler. Jeg tror at frekvensen først stiger og så synker innenfor samme del.

#### **bokfink1C3.wav**

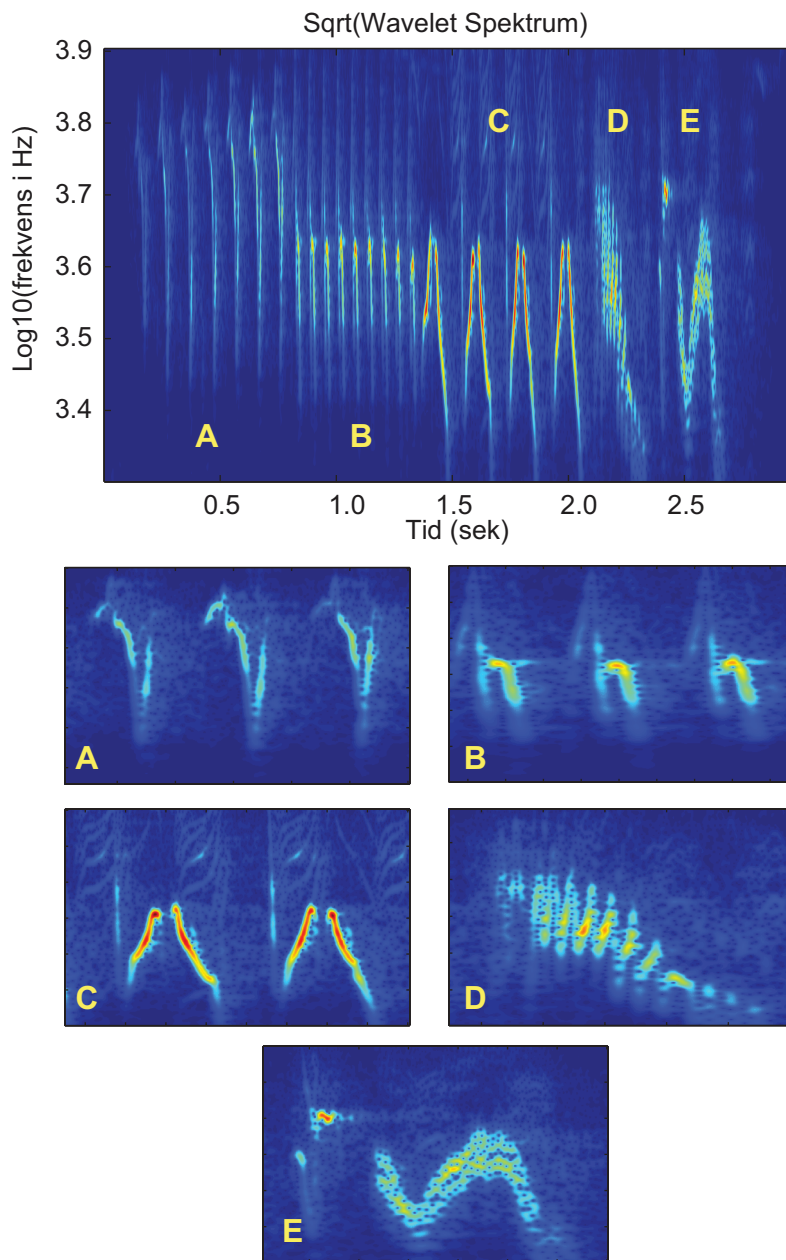
Her er det bare tatt med en av de fire like lydene i tredje fase i bokfinksangen. Når jeg spiller den alene, er det lettere å oppfatte at lyden først stiger i frekvens, dernest avtar i frekvens. Denne sekvensen synes lydstyrken å være den samme hele tiden, unntatt en økende fase helt i starten og en avtakende fase til slutt.

#### **bokfink1D.wav**

Fjerde fase består av en relativt lang lyd med litt synkende frekvens mot slutten. Det virker som om intensiteten varierer meget raskt noe liknende det vi så i AM.wav-lyden.

Totalt sett opplevde jeg det lettere å analysere lydene når jeg hørte de ulike fasene hver for seg enn da jeg hørte hele strofen på en gang.

For lyden bokfink1C3.wav var det laget en syntetisk etterligning som kunne kjøres i ulikt tempo uten at frekvensen endret seg (vha Matlabprogrammet interpolF9.m som var lagt ut fra kursledelsen). Før vi går videre kan det være interessant å plote en waveletanalyse av bokfinksangen, både hele strofen og den delen vi skal studere nærmere gitt i bokfink1C3.wav. Resultatet er vist i figur 18.

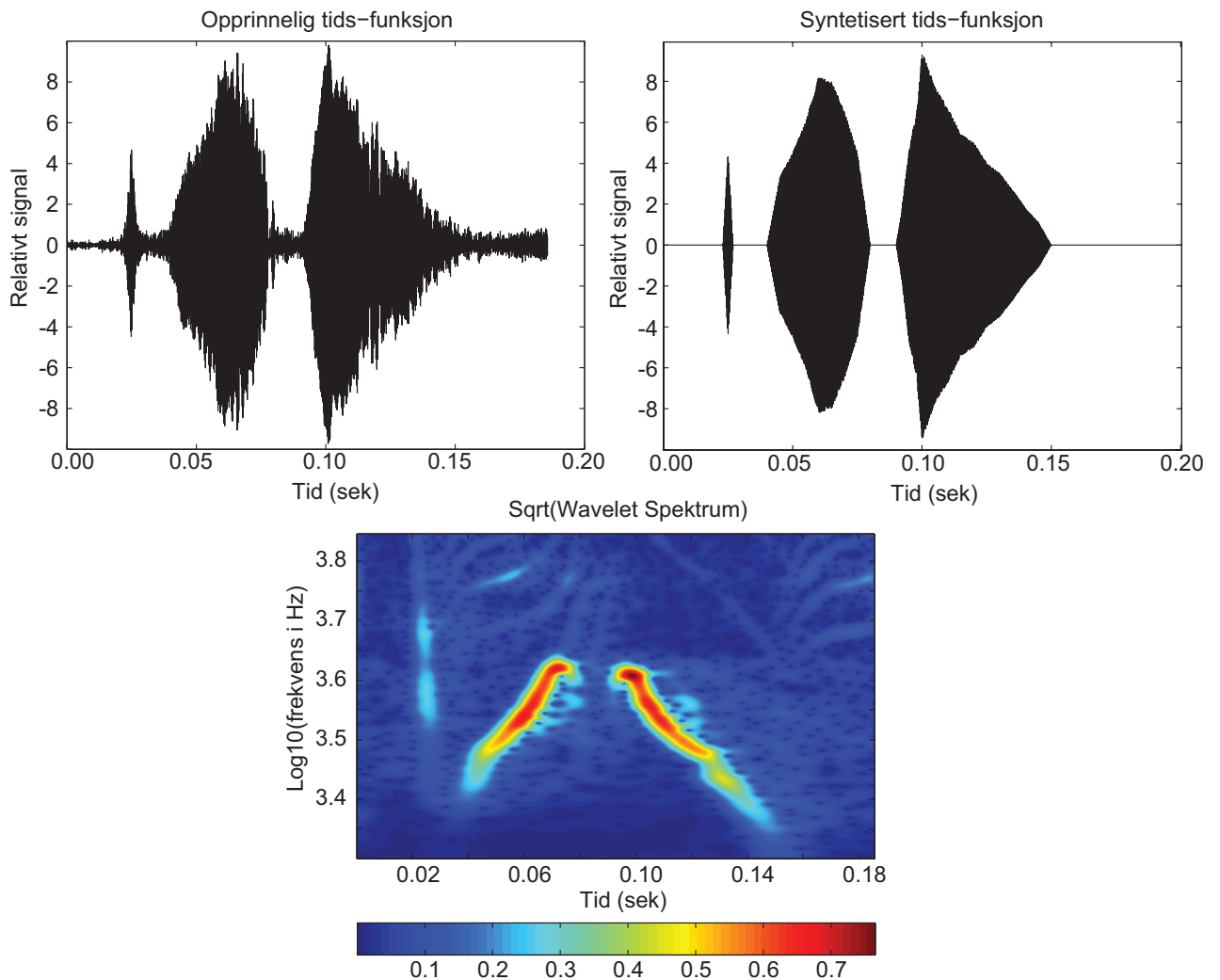


Figur 18: Waveletanalyse av lydfilen bokfink1.wav.  $K=48$  og frekvensområdet er fra 2000 til 8000 Hz. Jeg har zoomet inn i ulike deler av strofen for lettere å se hvordan frekvensen varierer innenfor hver fase av sangen.

Jeg lyttet så til den syntetiske kopien av fase C i bokfinksens sang. Jeg kunne da spille av lyden i ”langsom kino” og kunne på den måten få med meg flere detaljer jeg ikke hadde oppfattet i normalt tempo.

Figur 19 viser tidsbildet til den originale lyden (3. del av C-fasen) sammen med tidsbildet av den syntetiske lyden. Bakgrunnsstøyen er fjernet i den syntetiske lyden, ellers ser de rimelig like ut mhp amplituder vs tid. I samme figur er det også tatt med waveletanalysen av orginallyden.





Figur 19: Tidsbildet av en detalj i bokfinksangen sammen med en syntetisk kopi av den samme detaljen. Det er også tatt med waveletanalyse av den samme detaljen (for originallyden).  $K=48$  og frekvensområdet er fra 2000 til 7000 Hz.

I tidsbildet for lyden ser vi at lydsnutten inneholder tre partier som er temmelig adskilt fra hverandre. I den syntetiske versjonen blir de helt atskilt siden vi har ikke inkludert bakgrunnsstøy.

Oppgaven gikk ut på

- 1) å se hvor stor tidsforlengelse som måtte til for å oppfatte den første, meget kortvarige lydimpulsen (at den ikke forsvinner fra oppmerksomheten vår pga det etterfølgende mer dominerende signalet), og
- 2) hvor stor tidsforlengelse som måtte til for at vi oppfatter at lydstyrken er null mellom de to dominerende partiene i lyden.

Jeg lyttet til lyden og varierte tidsforlengelse-parameteren i programmet `interpof9.m`, og fant at jeg måtte opp i en tidsforlengelse på 4-5 for å kunne legge merke til den første kortvarige lydimpulsen, og jeg måtte opp i en tidsforlengelse på ca 14 for å merke at lydstyrken faller mye mellom de to dominerende partiene i lyden.

Jeg leste av fra tidsbildet av lyden at mellomrommet mellom de to dominerende partiene er omtrent 12 ms. Det betyr at siden jeg måtte ha en tidsforlengelse på ca 14X, måtte det altså til om lag 170 ms før jeg oppfattet at det var et kraftig fall i intensitet. For meg virker det som en lengre tid enn øret selv ville bruke på å oppdage lydstyrkeforandringen. Min løst begrunnede hypotese er derfor at hjernens etterprosessering lager et mer kontinuerlig lydbilde enn det den faktiske lyden innebærer.

I oppgaveteksten ble det antydnet at vi burde vurdere vår evne til å følge lyder med rask endring i frekvens.

I deloppgave 2 så vi at når vi hadde lydene med kortest varighet, kunne vi skille to lydimpulser dersom

frekvensforandringen var 20 Hz når lydimpulsens lengde var gitt ved  $s = 0.006$  s

frekvensforandringen var 8 Hz når lydimpulsens lengde var gitt ved  $s = 0.0125$  s

frekvensforandringen var 6 Hz når lydimpulsens lengde var gitt ved  $s = 0.25$  s

Vi så at det syntes å være en lovmessighet her ved at produktet av forskjell i frekvens og lydimpulsens lengde gikk mot en grenseverdi:  $\Delta f \sigma = 0.12$  omtrent. I det forsøket vi gjorde i deloppgave 2 ville vi hørt forskjeller i lyd for alle kombinasjoner der  $\Delta f \sigma > 0.12$ .

Det kan være interessant å sammenligne denne parameteren/verdien med det vi opplevde da vi hørte på tredje parti i bokfinkens strofe. Vi leser av tider og frekvenser i hver ende av den oppadstigende hoveddelen av bokfink1C3.wav slik vi ser diagrammet i nedre del av figur 19. Jeg leser av at frekvensen endrer seg fra 2985 til 4217 Hz i tiden 0.4117 til 0.4366 s. Dette er en forandring på 1232 Hz i løpet av 25 ms. Forsøker vi oss med en beregning av  $\Delta f \Delta t$  i dette tilfellet, ville svaret blitt 30.8. Dette er MYE større enn 0.12, og vi kunne ha lyst å konkludere at en så dramatisk endring i frekvens burde øret vårt fange opp meget lett. Likevel var det slik at det bare var så vidt at vi klarte å høre at frekvensen i den første hoveddelen av bokfink1C-lyden endret seg fra en lav til høyere frekvens.

Det er imidlertid vanskelig å sammenligne resultatene fra deloppgave 2 til det vi har observert ved lytting til bokfinkens sang, siden dette er to temmelig forskjellige forsøksbetingelser. I deloppgave 2 hadde vi meget enkle stimuli og testen vi gjorde var meget enkel. Når vi lytter til bokfinkens sang, er stimuli mye mer komplisert og tiden kommer inn på en ganske annerledes måte. Likevel er det interessant at det er så vanskelig å oppfatte detaljer i bokfinkens sang.

Alt i alt kan jeg si at deloppgave 4 synes å vise at når vi mottar mengder av sanseinntrykk hvert sekund, er det en dramatisk siling og bearbeiding i sansene og hjernen før inntrykkene når bevisstheten vår. Eller som det ble sagt på NRKs Newton-program den 26. april i år: "Bevisstheten har en utrolig liten kapasitet."

## Poengsetting for deloppgave 4.

Som nevnt tidligere vurderes kvalitet på figurer og dataprogrammer samlet til slutt i vår vurdering. Her kommer mer faglige vurderinger ellers:

Maksimalt oppnåelig poeng: 10

- Max 5 poeng for lytteprøven i første del. Vi må ha med en viss beskrivelse og vurdering om det hjalp mhp å oppfatte detaljer at vi fikk spilt av bare deler av bokfinkstrofen.
- Max 5 poeng for siste del med tidsforlengelse. Har kandidaten funnet en tidsforlengelse som er rimelig, og har hun/han litt kommentarer omkring dette? Den siste delen av diskusjonen som gikk på å sammenholde resultater fra deloppgave 2 med det vi gjorde her, teller ikke mer enn max to av de fem poengene.



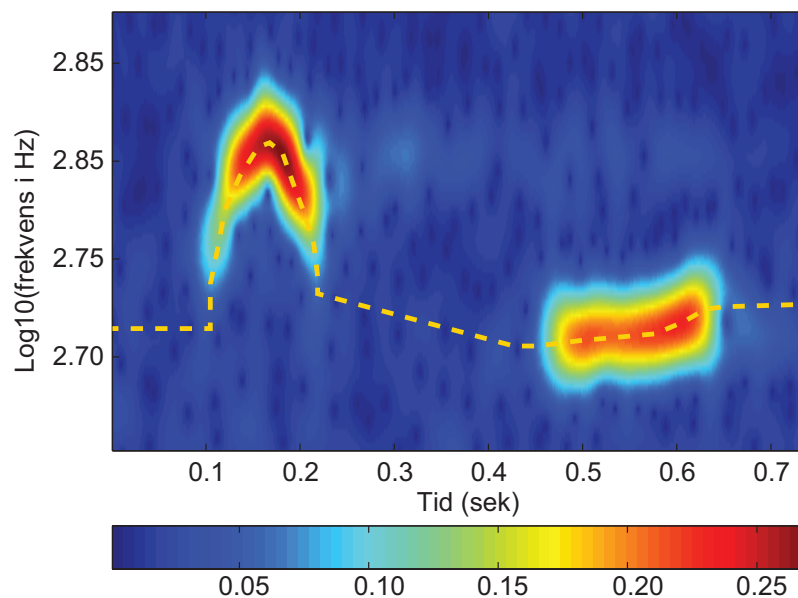
## Del 5:

### Ekstrahering av data fra et waveletdiagram, lage en datafil og kjøre interpolf9.m for å teste at vi får en ok syntetisk lyd.

I den aller siste deloppgaven skulle vi bruke waveletanalyse som utgangspunkt for å lage en syntetisk lyd av gjøkens ko-ko. I denne oppgaven er det en felle. Absoluttverdien til den wavelettransformerte til et signal gir ”relativ amplitude på signalet som funksjon av tid og analysefrekvens”. Vi har imidlertid valgt å vanligvis vise *kvadratroten* av absoluttverdien. Da må vi korrigere for dette når vi leser av verdier fra waveletdiagrammet!

Når vi ekstraherer data fra waveletdiagrammet, ønsker vi å lese av amplituder ved ulike tider for den delen av waveletdiagrammet vi er interessert i. Vi tok bare med oss grunntonen for gjøkens sang. De høyere harmoniske var dessuten ganske svake, så tilnærmingen bør ikke lide mye av den grunn.

Figur 20 viser waveletdiagrammet for en av gjøkens ko-ko. Jeg har tegnet inn en stiptet linje som viser hvor jeg spaserte gjennom diagrammet for å ekstrahere verdier for bruk i datafilen for syntese av lyden. Jeg passet på å ha punkter der intensiteten gikk ned til null både før første del, mellom de to delen, og etter siste del. Selve måledataene er gitt sist i beskrivelsen av denne deloppgaven.



Figur 20: Waveletbildet av gjøkens ko-ko-sang.  $K=44$  og frekvensområdet er fra 450 til 750 Hz. Stiplet linje viser veien jeg brukte gjennom signalet mens jeg leste av samhoørende verdier av tid,  $\log_{10}(\text{frekvens})$  og  $\text{sqrt}(\text{wlt-amplitude})$ .

Som nevnt ovenfor, må avleste verdier korrigeres dersom vi leste av i et diagram hvor det er kvadratroten av wavelettransformasjonen som er gitt. Dette ordnet jeg ved å putte inn tre par ekstra linjer i programmet interpolf9.m, på følgende måte (markert del):

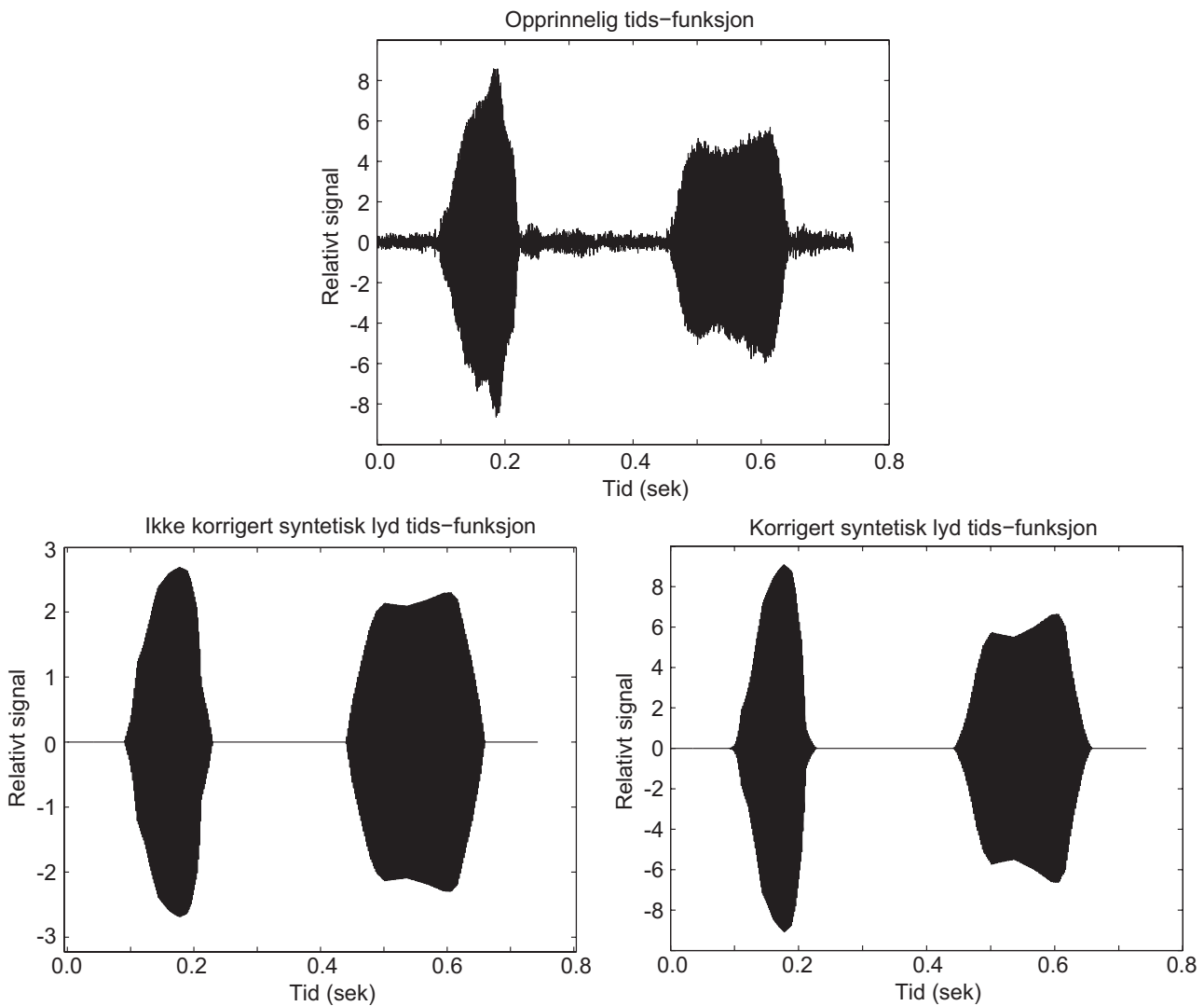
```

freqValues = 10.^freqValues; % Fra log10-verdier til lineære frekvenser
toPi = 2.0*pi;
freqValues = toPi.*freqValues; % Fra nå av er freqValues omega-verdier!!!
ampValues = ampValues.*ampValues; % For å korrigere for sqrt(wavelet)
mxa = 1.1*max(ampValues);
ampValues = ampValues/mxa;

```

Som vi ser la jeg også inn en skalering slik at maksimal amplitude ble nær 0.9, siden lydfiler bør ha amplitude mindre eller lik 1 før de spilles av i Matlab.

I figur 21 er tidbildet vist både for den originale lyden og for den syntetiske lyden. Jeg har også tatt med hvordan lydbildet blir dersom vi ikke korrigerer for kvadratroten i waveletdiagrammet vårt.



Figur 21: Tidbildet av gjøkens ko-ko-sang i original (øverst), mens en syntetisk versjon er vist nederst. Til venstre har jeg ikke korrigert for at jeg oftest viser kvadratroten av waveletverdiene i diagrammet, men til høyre har jeg korrigert for dette.

Vi ser at uten korrigering, blir amplitude vs tid litt for "rund" på toppene og områder med liten amplitude blir tilsynelatende forstørret sammenlignet med toppene.

Jeg ser at jeg kunne vært heldigere med utvalg av punkter for å få detaljer i toppen på første ko litt bedre enn jeg nå har fått.

Når jeg lyttet til de to variantene hørtes det ut som om den ukorrigerede lyden var litt mer avrundet enn den korrigerede. Begge var temmelig lik den originale. Bortsett fra bakgrunnsstøyen synes jeg den syntetiske lyden var svært lik den originale.

Det er artig at vi kan lage så god syntetisk lyd bare ved å bruke et temmelig lite antall datapunkter!

Her er datapunktene jeg lot inngå i min fil brukt for å lage syntetisk fil vha programmet `interpolf9.m`:

0.0000	2.708	0.0000
0.0900	2.708	0.0000
0.0986	2.708	0.03022
0.1026	2.728	0.05352
0.1105	2.757	0.1214
0.1210	2.775	0.1516
0.1354	2.791	0.2101
0.1433	2.800	0.2381
0.1604	2.809	0.2589
0.1696	2.809	0.2649
0.1775	2.807	0.2687
0.1894	2.798	0.2637
0.1959	2.789	0.2475
0.2051	2.775	0.2034
0.2091	2.764	0.1525
0.2117	2.748	0.0896
0.2236	2.717	0.0376
0.2300	2.717	0.0000
0.4400	2.708	0.0000
0.4498	2.708	0.0606
0.4669	2.708	0.1334
0.4774	2.708	0.1745
0.4879	2.708	0.2005
0.5011	2.710	0.2134
0.5195	2.712	0.2108
0.5366	2.710	0.2089
0.5681	2.714	0.2182
0.5944	2.717	0.2289
0.6063	2.719	0.2296
0.6168	2.721	0.2186
0.6392	2.721	0.1239
0.6523	2.723	0.0541
0.6600	2.723	0.0000
0.9000	2.723	0.0000

## Poengsetting for deloppgave 5.

Som nevnt tidligere vurderes kvalitet på figurer og dataprogrammer samlet til slutt i vår vurdering. Her kommer mer faglige vurderinger ellers:

Maksimalt oppnåelig poeng: 10

- Max 2 poeng for å beskrive kort hva man gjør.
- Max 2 poeng for å ha med et plot lignende figur 21 som sammenligner tidsresponsen til original og syntetisk lyd.
- Max 2 poeng for å ta med datafilen i rapporten.
- Max 2 poeng for å ta med datafilen i rapporten.
- Max 2 poeng for generell kommentar om likhet i lyd og litt om informasjonsmengde.

## Poengsetting for vurdering av figurer generelt

NB: Dersom figurer ikke holder mål, gis det et TREKK (minuspoeng) som følger:

Maksimalt oppnåelig minuspoeng: -10

- Max 3 poeng trekk dersom tekst langs aksene mangler (i mange av figurene)
- Max 2 poeng dersom skriftstørrelsen på tekst i figurene er for liten eller sjenerende stor i endelig innlevering.
- Max 2 poeng trekk dersom linjetykkelser er sjenerende tynne eller tykke, eller dersom man ikke har med markeringer av datapunkter når det ville vært en avgjort fordel.
- Max 3 poeng for uheldig utvalg av figurer, dårlig sammenbinding av figurer og tekst, og dersom figurnummer mangler

Husk at vurdering av kvalitet av data skal inngå i vurderingen av hver enkelt deloppgave. Når det gjelder trekk skal disse bedømmes ut fra et helhetsinntrykk av hele rapporten.

## Poengsetting for vurdering av figurer generelt

NB: Dersom dataprogrammer ikke holder mål, gis det et TREKK (minuspoeng) som følger:

Maksimalt oppnåelig minuspoeng: -10

- Max 3 poeng trekk dersom koden er kompakt og uoversiktlig.
- Max 2 poeng dersom det ikke er tatt med passe mange kommentarer. Det gis trekk både ved for få og for uhorvelig mange kommentarer.
- Max 3 poeng trekk dersom man ikke har kommentert endringer i programmer som opprinnelig er laget fra kursledelsens side, og der det må til noen få endringer i enkelte deler av oppgavene.
- Max 2 poeng for å ikke ha inkludert koden for de deloppgavene der dette er naturlig (spesielt deloppgave 2).

Husk at vurdering av dataprogrammer bedømmes ut fra et helhetsinntrykk av hele rapporten.

**NB: Dersom noen har laget et program som er særdeles elegant, kan det gis opp til 5 plusspoeng for å belønne dette!**

## Vedlegg 1: Matlabprogram brukt i deloppgave 1.

```
% Testprogram for å undersøke amplituden til tvungne svingninger når
% den påtrykte kraften bare varer en liten stund (gaussisk omhylling).
% Programmet er laget for å teste en mulig prosjektoppgave i kurset
% FYS2130 ved UiO våren 2012. Skrevet av Arnt Inge Vistnes 4-23. april 2012.
% Programmet kaller på funksjonen rk4s og fxs og fvs. HUSK at fvs MÅ
% justeres for å få med en kraft som bare varer ved en begrenset tid.
```

```
function svingningN12L
versjon = 'G 5. mai 2012';
```

```
global param;
```

```
% Her velges parametrene for beregningene.
```

```
*****
```

```
AntallPerioder=120;      % Antall perioder beregningene går over
n_pr_T=256;              % Velger 256 punkt pr periode
k = 39.48;               % "Fjærstivheten"
m = 1.0e-4;              % Loddets masse
b = 2.5132e-3;          % Friksjons-faktor
Fmax=1.0e-03;           % Amplituden for påtrykt kraft
tTopp = 0.40;           % Tidspunkt der påtrykt kraft skal ha max verdi
sigma = 0.025;          % Bredde (i tidsenheter) for når påtrykt kraft
                        % har sunket til 1/e av max (amplitudeverdier)
                        % Bruk 0.00625,0.0125,0.025,0.05,0.10,0.20,0.40,1.0
```

```
startpos = 0.0;
startfart = 0.0;
filnavn='svingN12L.txt'; % Navn på fil hvor parametre og resultater skal
                        % lagres for senere dokumentasjon
```

```
*****
```

```
% Videre beregninger:
```

```
topi = 2.0*pi;
omega0=sqrt(k/m);        % Grunn-vinkelfrekvensen beregnes
f = omega0/topi          % og frekvensen skrives ut
Q = sqrt(m*k)/b          % Q-verdi (skrives ut)
omegaD=omega0;           % Bestemmer frekvens for påtrykt kraft
T0=2*pi/omega0;         % Svingetid for enkel harmonisk bevegelse
N=n_pr_T*AntallPerioder; % Antall punkter alt i alt i beregningen
delta_t=double(T0/n_pr_T); % Delta_t valgt ut fra det ovenforstående
```

```
% MERK: Også fx og fv bør dokumenteres, f.eks. slik:
```

```
fxLigning = 'dxdt = vc;';
fvLigning1 = 'relT = tc-param.topp;';
fvLigning2 = 'dvdt = -param.kn*xc - param.bn*vc + `;
fvLigning3 = 'param.Fmaxn*exp(-(relT*relT)/param.sigma2)*cos(param.
omegad*relT);';
```

```
*****
```

```
% Parametre nedenfor denne linjen skal ikke endres uten at
% programmet får nytt versjonsnummer (eller at endringen
% dokumenteres på annet vis).
```

```
param.kn=k/m;           % Normerte størrelser inn i en struktur
param.bn=b/m;           % "param"
param.Fmaxn=Fmax/m;
param.omegad=omegaD;
param.topp=tTopp;
param.sigma2= sigma*sigma;
```

```
% Testutskrift (kommentert ut nå)
```

```

%param

% Testplot for å vise kraften vs tid, og den fouriertransformerte av denne
tc = 0;
for i = 1:N
    tc = i*delta_t;
    tPlot(i) = tc;
    relT = tc-param.topp;
    Ft(i) = param.Fmaxn*exp(-(relT*relT)/param.sigma2)*cos(param.omegad*relT);
end;
figure;
plot(tPlot,Ft,'-g');
title('Kraft vs tid (senterfrekvens)');
xlabel('Tid (s)');
ylabel('F(t)');
fftF = abs(fft(Ft));
fftFmax = max(fftF);
fftF = fftF/fftFmax;
fr = linspace(0,1/delta_t,N);
lim = floor(N/100);
figure;
%plot(fr(1:lim),fftF(1:lim),'-b');
plot(fr(1:lim),fftF(1:lim).*fftF(1:lim),'-b');
title('Frekvensspekteret til kraften');
xlabel('Frekvens (Hz)');
ylabel('fft^2(F) (rel)');

% Forbereder loop
pkt = 31;
deltaOmega = 0.3*omega0;
omegavalgt = linspace(omega0-deltaOmega,omega0+deltaOmega,pkt);
ymax2 = zeros(pkt,1);
linjex = zeros(2,1);
linjey = zeros(2,1);

for II = 1:pkt % SUPERLOOP
    omegad = omegavalgt(II); % Overskriver verdi gitt tidlig i programmet
    param.omegad=omegad; % Overskriver verdi gitt tidlig i programmet

    % Initierer/allokerer arrayene vi trenger
    x=zeros(N,1);
    t=zeros(N,1);
    v=zeros(N,1);

    % Setter initialbetingelsene
    x(1)=double(startpos);
    v(1)=double(startfart);
    t(1)=0;

    % Dernest kjøres løkken for å følge videre utvikling
    for j=1:N-1
        [x(j+1), v(j+1), t(j+1)]=rk4s(x(j),v(j),t(j),delta_t,param);
    end

    mxx = max(x);
    ymax2(II) = mxx*mxx;
    iterasjon = II
end; % SUPERLOOP

% Plotter frekvensresponsen
figure;
plot(omegavalgt/topi,ymax2,'-r');
title('Max utslag vs frekvens');

```

```

xlabel('Frekvens (Hz)');
ylabel('Max utsving (meter)');
ymaxHalf = max(ymax2)/2.0;
hold on;
linjex(1) = omegavalgt(1)/topi;
linjex(2) = omegavalgt(pkt)/topi;
linjey(1) = ymaxHalf;
linjey(2) = ymaxHalf;
plot(linjex,linjey,'-b');

% Diverse plot, først for posisjon vs tid, sammenlikner med analytisk
% x_analyt = startpos*cos(2*pi*t/T0); % Ikke generelt!
figure;
plot(t,x,'-r');
%axis([0.0 5.0 -0.55 1.1]) % Bør kuttes ut vanligvis!
%plot(t,x,'-r',t,x_analyt,'-b');
%legend('numerisk løsning','analytisk løsning');
title('Posisjon vs tid'); % Skift ut tallet etter hva som beregnes
xlabel('Tid (sek)');
ylabel('Utsving (meter)');
ymax=max(x)

% Dokumentasjon på kjøring (for lagring)
fileID = fopen(filnavn, 'w');
fprintf(fileID,'Kjøring %s av programmet "svingning",', date);
fprintf(fileID,' versjon: "%s " \r\n \r\n',versjon);
fprintf(fileID,'AntallPerioder %d \r\n', AntallPerioder);
fprintf(fileID,'n_pr_T %d \r\n', n_pr_T);
fprintf(fileID,'Fjærstivhet k %f \r\n', k);
fprintf(fileID,'Massen m %f \r\n', m);
fprintf(fileID,'Friksjonsparameter b %f \r\n', b);
fprintf(fileID,'Påtrykt kraft Fmax %f \r\n', Fmax);
fprintf(fileID,'omega0 %f \r\n', omega0);
fprintf(fileID,'omegaD %f \r\n \r\n', omegaD);
fprintf(fileID,'Difflikninger: \r\n fx: %s \r\n', fxLigning);
fprintf(fileID,' fv1: %s \r\n \r\n ', fvLigning1);
fprintf(fileID,' fv2: %s %s \r\n \r\n ', fvLigning2, fvLigning3);
fprintf(fileID,'Beregnete data t(i), x(i), v(i) \r\n');
for i=1:N
    fprintf(fileID,'%f %f %f \r\n', t(i), x(i), v(i));
end;
fclose(fileID);

input('\Lukk alt');
close all;

```

---

```

function dvdt = fvs(xc,vc,tc,param)

```

```

% Dempet og påtrykt svingning, påtrykt gis som en gaussisk puls
Ft = param.Fmaxn*exp(-(tc-param.topp)*(tc-param.topp)/param.
sigma2)*sin(param.omegad*tc);
dvdt = -param.kn*xc - param.bn*vc + Ft;

return;

```



## Vedlegg 2 Matlabprogram brukt i deloppgave 2.

```

function diskrimLyd

% Program som genererer to lydsnutter med ett sekunds mellomrom, der
% frekvensen til den første snutten kan være forskjellig fra den andre, men
% dette er bestemt ut fra en randomfunksjon. Programmet gir til slutt
% sekvensen som faktisk ble brukt (0: samme frekvens, 1: ulik frekvens).
% Programmet utviklet ved utarbeidelse av prosjektoppgaven for FYS2130
% våren 2012. Denne versjonen er fra 5. april 2012. Arnt Inge Vistnes

f1 = 100.0;
f2 = 120.0;
antallTester = 10;
Fs = 44100;
t = linspace(0.0,2.0,2*Fs);
t1 = 0.5;
t2 = 1.5;
sigma = 0.006; %s = 0.4, 0.2, 0.1, 0.05, 0.025, 0.0125, 0.006 s.
sigma2 = sigma*sigma;
omhylling1 = exp(-(t-t1).*(t-t1)/sigma2);
omhylling2 = exp(-(t-t2).*(t-t2)/sigma2);
frekvensValg = zeros(antallTester,1);

toPif1 = 2.0*pi*f1;
lyd1 = omhylling1.*sin(t.*toPif1);
toPif2 = 2.0*pi*f2;
lyd2 = omhylling2.*sin(t.*toPif2);
lyd = lyd1;

for n = 1:antallTester
    n
    pause(0.7);
    c = clock;
    tm = c(6);
    r = rand;
    lyd(44101:88200) = lyd1(1:44100);
    frekvensValg(n) = 0;
    if (r>0.5)
        lyd(44101:88200) = lyd2(44101:88200);
        frekvensValg(n) = 1;
    end;

    %plot(t,lyd,'-b');
    ftLyd = fft(lyd);
    % plot(real(ftLyd),'-g');

    %wavplay(lyd,Fs);
    playerobj=audioplayer(lyd,Fs);
    playblocking(playerobj)
    pause(3.0);
end;

% Utskrift av testsekvensen
frekvensValg

```