

Jøran Rudi

Kort innføring i lydens fysikk og akustikk, psykoakustikk, digital innspilling og lydbehandling

av Jøran Rudi, Institutt for musikk og teater, UiO, høsten 2000

Hjem

Musikk og kunst

Prosjekter

Publikasjoner

Undervisning

CV, biografi, bilder

Personlig



Innhold:

- Innledning
 - Lydens fysikk og akustikk
 - Frekvens og amplitude
 - Klangfarge, spektra og deltoner
 - Etterklang og resonans
 - Psykoakustikk
 - Øret og hvordan det virker
 - Tonehøyde og amplitude
 - Rom og retning
 - Innspilling av lyd
 - Digital lydbehandling
 - Computermusikk
-
- Fotnoter
 - Litteraturliste

Innledning

Dette heftet er ment som en innføring til kunnskap som til nå ikke har vært særlig fokusert i utdanningen ved IMT, men siden moderne musikkvitenskap i økende grad beskjeftiger seg med det klingende objekt, nødvendiggjør dette en orientering i retning av lydens fysikk og akustikk, psykoakustikk, og digital representasjon av lyd.

Digital bearbeiding av lyd er et så utbredt virkemiddel i alle ledd av moderne musikkproduksjon at musikkvitenskapen nødvendigvis må inkludere kunnskap om dette - både de menneskelige og tekniske forutsetningene, og den mpraktiske utførelsen av selve arbeidet.

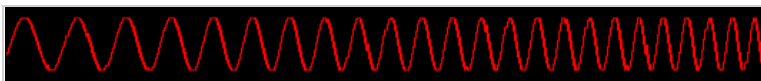
En innføringstekst så kort som denne må nødvendigvis være ufullstendig og inneholde en mengde grove forenklinger. For å avhjelpe denne åpenbare tilkortkommenheten er det vedlagt en omfattende litteraturliste med pekere til den viktigste litteraturen om feltene.

Innholdsfortegnelse

Lydens fysikk og akustikk

Frekvens og amplitude

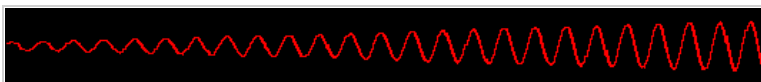
Lyd er variasjoner i lufttrykk innenfor det hørbare område - for mennesket mellom 20 - 20 000 ganger i sekundet. Dersom trykkendringene skjer sjeldnere enn 20 ganger i sekundet, oppfatter vi dem som vibrasjoner, og skjer de oftere, så hører vi dem ikke i det hele tatt. Benevnelsen Hertz beskriver antall trykkendringer pr. sekund, og angir frekvens. En trykkvariasjon som skjer regelmessig 50 ganger pr. sekund er altså 50 Hz.



Her ser vi at frekvensen øker; trykkendringene skjer oftere.

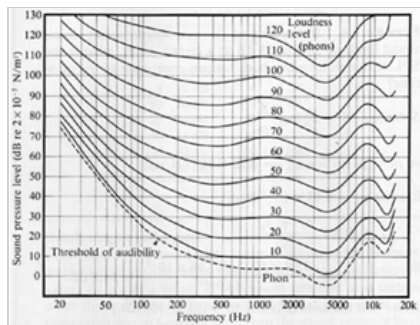
Menneskets hørsel reduseres for de flestes vedkommende med alderen, slik at man etterhvert mister evnen til å oppfatte de høyeste frekvensene, som for eksempel dem som lages av gresshopper. Hørselen kan også bli skadet dersom man vedvarende utsetter seg for høyt lydtrykk, som for eksempel på konserter og ved bruk av Walkman. Vi skal se mer på dette når vi skal diskutere hvordan hørselen virker. Mange dyrearter hører bedre enn mennesket; de hører frekvenser som er høyere enn 20 000 Hz.

Lyd kan bevege seg gjennom alle medier, og lydens hastighet gjennom luft under normale forhold ved havets overflate er ca. 334 meter/sekund. Luftfuktighet og temperatur påvirker lydhastigheten. Lyd kan også oppfattes direkte gjennom kroppens knokler, ved at de vibrerer og at vibrasjonene påvirker hørselsapparatet. Vi hører for eksempel vår egen stemme som en del dypere enn det den oppfattes av andre, nettopp på grunn av vibrasjonene i vår egen kropp som påvirker hvordan vi hører stemmen.



Her øker amplituden; utsvingningen blir gradvis større.

Lydstyrken kalles amplituden, og beskriver utsvingning. Forskjellen mellom forskjellige lydtrykk oppgis i Decibel (dB)¹. Fullstendig stillhet finnes bare i såkalte anekoiske rom, hvor ingen lyd slipper inn, og hvor det ikke finnes refleksjoner. Det man hører i slike rom er sin egen pust og susingen fra sitt eget blodsystem, litt på samme måte som man opplever det når man dukker under vann. Undervannsmiljøet er faktisk veldig bråkete, men vi hører ikke det så lett fordi mesteparten drukner i lyden fra oss selv. I hverdagslivet er det alltid et eller annet lydtrykk til stede, og normal dagligtale på 1 meters avstand ligger på ca. 60 dB SPL. Smertegrensen² ligger på rundt 100 dB SPL, som kan tilsvare for eksempel rop og skrik, eller lyd fra passerende store lastebiler.



Mennesket oppfatter ikke alle frekvensområder like godt, og følsomheten er størst i området 1000 - 2000 Hz. På figuren viser de bølgende linjene hvor sterke forskjellige frekvenser må være for å oppleves som like sterke. Slik kunnskap er viktig i utviklingen av lydkomprimeringsformater som f. eks. .mp3, hvor de områdene i lyden vi ikke hører så godt blir komprimert sterkere. Figuren er hentet fra Rossing, *The Science of Sound*, side 92.

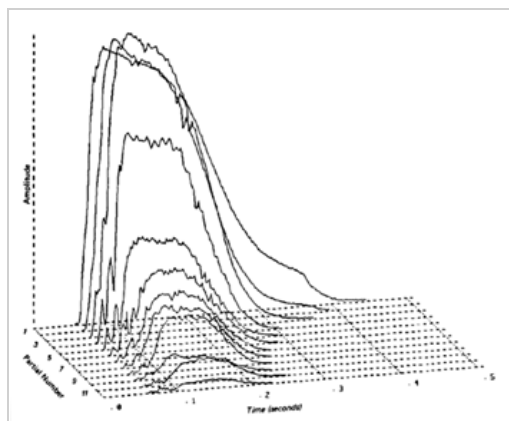
Vår evne til å høre klanglig detalj og skille frekvenser fra hverandre er sterkest ved lydtrykk på omlag 80 dB SPL, og avtar sterkt over 90 dB SPL³. Det hjelper derfor ikke *alltid* å skru lyden høyere dersom man ikke hører hva som skjer i musikken.

Klangfarge, spektra og deltoner

Den samme tonen spilt på forskjellige instrumenter klinger forskjellig, og klangen varierer også med hvor sterkt tonen blir spilt. Disse forskjellene i klangfarge har sin årsak i lydets sammensetning; lydets spektrum. Den franske matematikeren Joseph Fourier (1768-1830) kom frem til at enhver lyd kan analyseres som en kombinasjon av sinustoner, som er den enkleste tenkelige bølgeform.⁴ Hvilke sinustoner som er til stede, hvilken fase⁵ de har og hvor sterke de er, bestemmer klangfargen. Dette gjelder alle lyder, både harmoniske lyder og ikke-harmoniske lyder (støy). Harmoniske spektra kjennetegnes av en regelmessighet i hvordan de enkelte tonene (deltonene) fordeler seg; i et harmonisk spektrum er avstanden mellom deltonene den samme som frekvensen til grunntonen. Grunntonen 100 Hz har som harmonisk overtonerekke 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 600 Hz, 700 Hz, osv. 1. overtone har dobbelt så høy frekvens som grunntonen og er dermed en oktav over, 2. overtone er en kvint over 1. overtone, 3. overtone er en oktav to ganger høyere enn grunntonen. Det harmoniske spekteret danner grunnlaget for naturtoneskalaen, som avviker fra den kromatiske skalaen vi kjenner fra vestlig kunstmusikktradisjon.

Ikke alle musikkinstrumenter har harmoniske spektra, og ikke alle lyder som brukes i musikk er harmoniske. Tenk for eksempel på perkusjonsinstrumenter og klokker, og hvordan de ikke klinger "rent". Vi skal diskutere dette nærmere i den delen som handler om psykoakustikk. La oss bare nøye oss med i denne omgang å nevne at spektra i varierende grad kan kontrolleres gjennom spilleteknikk, slik for eksempel organister styrer klangfargen gjennom registrering (åpning og stenging av orgelpiper - deltoner).

Instrumenters klangfarge forandrer seg i tid, og dette kommer av at overtonene ikke har det samme innbyrdes forhold gjennom hele klangforløpet - overtonenes omhyllingskurve (envelope) er forskjellig. En berømt studie av dette er Jean-Claude Rissets arbeid med trompettoner fra 1969, og en figur derfra er gjengitt under.



Tiden løper langs X-aksen, amplituden langs Y-aksen, og kurvene viser hvor sterke deltonene er på forskjellige tidspunkter. Illustrasjonen er hentet fra *Computer Music Journal*.

Dersom vi kjenner et instrument godt, kan vi høre hvor i lyden et utsnitt er hentet fra, men dette er ofte veldig vanskelig, fordi det ofte er starten på en tone som forteller oss hvilket instrument den stammer fra.

Etterklang og resonans

Lydenes deltoner varierer innbyrdes i styrke og gir endringer i klangfargen. Men lyder farges også av sine omgivelser. Viktige begreper i musikkalsk sammenheng er refleksjon, resonans og etterklangstid. Refleksjon er at lyd "speiles" av for eksempel vegger, gulv og tak, resonans beskriver den egne svingning objekter får for når de utsettes for lyd (og som gjør at enkelte frekvensområder fremheves og andre dempes) - og etterklangstid beskriver hvor lang tid det tar for lyden å dø ut i et rom. I store rom tar det typisk lenger tid for lyd å dø ut enn i små rom. Lang etterklangstid kan gjøre lyden grøtete, og for eksempel raske passasjer i musikk blir vanskelige å oppfatte. Samtidig oppleves musikk som er uten noen form for romklang som lite attraktiv i de aller fleste tilfeller.

Forskjellige materialer har forskjellige egenskaper, og reflekterer frekvenser på ulik måte. Harde overflater reflekterer for eksempel

bedre enn porøse overflater, og rom med vegger av tre reflekterer høyere frekvenser dårligere enn lave. Forskjellige rom får dermed forskjellig klangkarakteristikk, og egner seg dermed til forskjellig bruk. For eksempel er det fornuftig å ha en annen klangkarakteristikk i et rom som skal brukes til tale enn i en konsertsal for orkestermusikk. Gode konsertsaler har en balansert karakteristikk, med det som kalles jevn frekvensrespons. Mange konsertsaler er også bygget slik at man kan forandre etterklangstiden ved å rotere eller flytte på paneler med forskjellig overflate. Det er viktig å være klar over at akustikken har mye å si for hva musikerne hører og hvordan de kan spille, og hvordan det innspilte resultatet klinger.

Innholdsfortegnelse

Psykoakustikk

Øret og hvordan det virker

Til nå har vi snakket om lydens direkte målbare størrelser, men en annen ting er hvordan vi som dyreart oppfatter disse størrelsene. Læren om hvordan vi oppfatter lyden i våre omgivelser kalles psykoakustikk. For å forstå hvordan dette virker, er det nødvendig med en viss kunnskap om hvordan øret virker.

Det ytre øret leder lyden inn i det indre øret, og trykkendringene i luften gjøres tilgjengelige for det indre øret gjennom overføring via delene trommehinne, hammer, ambolt og stighbøyle. Trykkbølgene forplanter seg så gjennom sneglehuset, som er et omlag 5 cm væskefylt langt rør. I dette røret sitter det tett i tett med små hår, som registrerer trykkbølgene. Lave frekvenser har lange bølger, høye frekvenser har korte bølger, og setter hårene i bevegelse der bølgetoppene treffer kantene i sneglehuset. Når hårene svinger, så trigges det nevroner som gir hjernen beskjed om hvilke innkommende data som er registrert. Nyere forskning synes å antyde at en del preprosessering finner sted i selve øret, men det er ennå ikke klarlagt akkurat hvilken.



Øret er kroppens mest kompliserte mekaniske instrument, og består av mer enn en million bevegelige deler.⁶
(Klikk på bildet for å se en større versjon.)



Flimmerhår

Tonehøyde og amplitude

Hårene i sneglehuset sitter tett i tett, og dersom øret mottar for eksempel to frekvenser som ligger svært nær hverandre, så oppfattes ikke to frekvenser, men én urolig frekvens. Fenomenet kalles "beating", og oppstår i det som kalles kritiske (frekvens)band. Her er et eksempel, hvor en sinustone gradvis nærmer seg en annen, og beating oppstår.

Avstanden i tid mellom lydbegivenheter er også problematisk dersom den blir for liten, og enkeltpulser blir til en tone dersom de spilles raskt nok etter hverandre. (lage lydex) Melodier med store sprang mellom tonene oppfattes som forskjellige slike strømmer dersom de spilles raskt; vår evne til å skille ut enkeltbegivenheter avtar som nevnt med økende intensitet også på amplitudenivå - vi skiller best enkeltlementer fra hverandre rundt 80 dB. Det foregår altså en form for prioritering i oppfattelseskjeden - en prioritering som påvirker vårt fokus. Mange lyder som på forskjellige måte er nær hverandre kategoriseres annerledes enn enkeltbegivenhetene. Dette er en form for maskering, som også finner sted ved at sterke signaler får "førsteprioritet" i køen inn i fortolkningsapparatet; de høres først selv om de faktisk skjer etter svakere lyder.

Viktig i identifisering av lydtkilder er også formanter, som er stabile og forsterkede frekvensområder i forskjellige resonatorer, som for eksempel vårt talesystem. Det er for eksempel lett å identifisere stemmer man kjenner godt i større samlinger av mennesker, og denne effekten har derfor fått det morsomme navnet "cocktailpartyeffekten". Flere dyrearter nyttiggjør seg eksistensen av formanter, for eksempel pingviner - som lett finner sine unger blant det som kan være tusenvis av andre.

Rom og retning

Hørselen er alltid på, og vi varsles effektivt om mange forandringer i våre omgivelser selv om vi sover. Resonanser lar oss høre hvor vi er i hvilke rom, vi hører hvilke andre lydtkilder enn oss som finnes der, og vi hører hvordan ting beveger seg i forhold til oss.

Vi har to ører, og ørebruskene filtrerer bort øvre deler av spekteret. Dette, pluss faseforskjeller som finnes ved at vi hører den samme lyden på to forskjellige steder som er ca. 25 cm fra hverandre, gjør det lett å følge lyders bevegelse også bak oss, selv om frekvensinformasjonen ikke er på langt nær så god som forfra.

Lyd mister mye av de øvre delene i spekteret gjennom lang transport, og vi hører dermed avstand gjennom både spektersammensetning og lydstyrke. Bruk av kunstig romklang i musikkproduksjon blir dermed bare ett av flere virkemidler for å skape romfølelse. Komponister som er kjent med psykoakustiske prinsipper bruker ofte denne kunnskapen for å skape rom i musikken, gjennom å anvise spilleteknikk eller å elektronisk endre spektersammensetningen.

En interessant effekt er også doppler-effekten, hvor lydets tonehøyde synker dersom lydtkilden fjærner seg raskt. Slike dopplerskift sier oss noe om hastighet, og hjelper ytterligere til i kartlegging av vår akustiske virkelighet.

Innholdsfortegnelse

Innspilling av lyd

Mikrofoner inneholder membraner som svinger med endringer i lufttrykket. Endringene gjøres deretter om til endringer i spenning (Volt). For at dette signalet skal kunne lagres digitalt, så må det omgjøres til binære tall. Dette forgår ved at signalet måles mange tusen ganger i sekundet, og at tallene lagres i maskinminne eller på harddisk. Denne prosessen kalles sampling.

Vi vet at vi kan høre frekvenser opp mot 20 000 Hz, og for at vi skal få med oss hele frekvensområdet må antallet målinger vi gjør være dobbelt så stort. Dette kalles Nyqvists teorem⁷. Avspilling skjer ved at disse måletallene gjøres om til spenningsvariasjoner gjennom en digital - analog konverter og forsterkes på vanlig måte.

For å få vite noe om hva slags frekvensinformasjon som finnes i lydfilen, må den analyseres, og dette skjer oftest ved at vi samler mange måletall i det som kalles vinduer, og så ser om vi finner regelmessigheter i måletallene som angir frekvens- og amplitudemønstre. Antallet målinger som grupperes sammen kan være 1024, for eksempel. Dersom antallet målinger i hvert vindu er høyt, så får man god informasjon om frekvenser i lydfilen, og dersom antallet målinger i hvert vindu er få, så får man god informasjon om rytmisk presisjon.

Når man genererer lyd i et digitalt instrument eller i datamaskinen, så skjer det oftest ved at man bruker en eller form for automatikk for å regne ut alle tallene som er nødvendig for å oppnå CD-kvalitet. MIDI har ingenting med selve lyden å gjøre, men er en måte å styre elektronisk utstyr på, gjennom for eksempel å si at toner skal skrues av og på, at parameterverdier som lydstyrke skal øke eller minke, osv. MIDI-informasjonen er veldig liten, og derfor praktisk for fremføringsformål, men inneholder ikke nok detalj til å være interessant i lydprosesseringsammenheng.

Innholdsfortegnelse

Digital lydbehandling

Med måledataene på disk er det en lett sak å behandle lyden på forskjellige måter. Dersom man for eksempel multipliserer *alle måletallene* med et tall, så øker lydstyrken jevnt over. Dersom man multipliserer *frekvensene* i et spektrum med det samme tallet, så øker eller senker man tonehøyden, men dersom man *legger til en verdi* på alle frekvensene så forandrer man tonekvaliteten fordi spekterets enkeltkomponenter da ikke lenger har det samme innbyrdes forhold. (Harmoniske spektra er spektra der deltonene er heltallige multipler av grunnfrekvensen.) Man kan lett gjøre lyder lengre og kortere, eller bare ta deler av en lyd og klemme sammen, strekke eller bøye. Mulighetene er nærmest ubegrensede, og det er opp til fantasien.

Slik lydbearbeiding som dette er del av nærmest hvert eneste musikalske uttrykk vi hører, fordi teknologien er integrert i alt profesjonelt (og "frivillig") arbeid med lyd. Bearbeiding av lyd er en særdeles normal og vanlig forekomst, selv om vi ikke så ofte tenker på det, og det er derfor ekstra viktig å være bli kjent med noen av prinsippene og teknikkene som brukes. Øyvind Hammers tekst om sampling og rekonstruksjon i litteraturlisten er god lesning om dette, og teksten er en del av heftet *Digital lydbehandling* som kan leses på nettet, eller lastes ned som en Postscript-fil fra NotAMs [tekstside](#).

Innholdsfortegnelse

Computermusikk

Computeren har som et nytt instrument brakt med seg kvalitativt nye muligheter for arbeid med musikk. De tre viktigste er:

- Bearbeiding av lyd fra naturen på spektralnivå
- Mulighet for å komponere med komplekse algoritmer
- Mulighet til å sette opp regler for kompleks interaksjon mellom musiker og materiale.

Komponister av computermusikk er som oftest inneforstått med psykoakustiske emner såvel som prinsippene for signalbehandling, og computermusikk streber alltid mot å spille meningsfullt på våre persepsjonsevner gjennom å bevisst nyttiggjøre seg de fysiske over som styrer hvordan lyd oppfører seg og hvordan vi oppfatter den. Computermusikk er et derfor et interessant felt å arbeide i, og åpner for mye interessant forskning.

Mye av all kunnskapen nevnt i dette heftet er resultat av den forskning på lyd og lydbehandling som foregår i fagmiljøer som er plassert mellom vitenskap og kunst. Etterhvert har musikkindustrien en betydelig egenutvikling av slik kunnskap, og formålet er å kunne tilby nye instrumenter og prosesseringsenheter og -programmer ut ifra en kommersiell tankegang. Siktemålet er et annet enn det som finnes i akademien, og selv om bruk av datamaskiner nå er vanlig i nær sagt alle musikkgenrer, så trives computermusikken best der forskning og kunst smelter sammen på grunn av felles interesse for hvordan ny kunnskap kan fravristes naturen.

Innholdsfortegnelse

Fotnoter

1:

Decibel (dB) er et mål på [forskjell](#) i lydstyrke, som av praktiske grunner oppgis logaritmisk, siden ørets evne til å oppfatte forskjeller i volum spenner over et svært stort område. Lydstyrke oppgis enkelte ganger i dB SPL (Sound Pressure Level), dvs. i forhold til den svakeste lyden vi kan høre.

Tilbake

2:

Jetfly som letter	120 dB SPL
Byggeplass	110 dB SPL
Rop (1.5 m)	100 dB SPL

Tung lastebil	90 dB SPL
Inne i personbil	70 dB SPL
Normal samtale (1 m)	60 dB SPL
Soverom om natten	20 dB SPL
Rasling i løv	10 dB SPL

Tabellen er hentet fra: Thomas D. Rossing, *The Science of Sound* (Addison-Wesley Publishing Company, 1990, s. 86.

3:

Fotnote med tabell av hva vi hører best

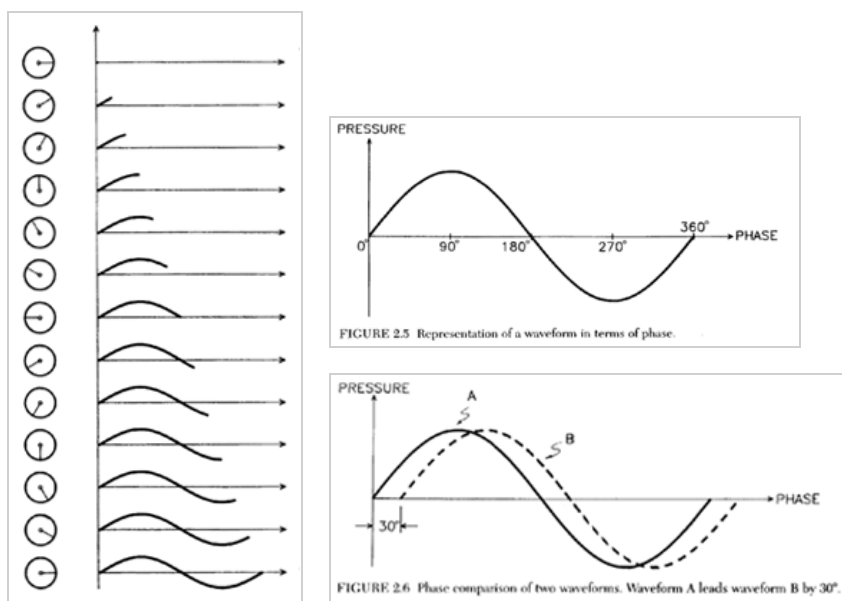
[Tilbake](#)

4:

Fouriers teorem: Enhver periodisk funksjon kan konstrueres ved å summere et antall sinus- og cosinusfunksjoner, hver med en rekvnnes som er et heltallsmultiplum av frekvensen til den periodiske funksjonen. I Øyvind Hammer, *Matematikk for musikere* (NoTAM, 1994), s. 16.

[Tilbake](#)

5:



En bølgeforms fase måles som en vinkel fra et gitt utgangspunkt. Figurene er hentet fra Charles Dodge og Thomas Jerse, *Computer Music* (Schirmer Books, 1985, 1997), s. 30 og 31.

[Tilbake](#)

6:

Fra A.J. Hudspeth, "The cellular basis of hearing: The biophysics of hair cells", *Science* (1985), s. 230.

[Tilbake](#)

7:

Nyquists teorem: For å digitalt kunne representere et signal med frekvenskomponenter opp til X Hz, er det nødvendig å bruke en samplingsfrekvens som er minst 2X samples/sekund. Fra: Richard Moore, *Elements of Computer Music* (Prentice Hall 1990), s. 41.

[Tilbake](#)

[Innholdsfortegnelse](#)

Litteraturliste

- Bregman, Albert S. *Auditory Scene Analysis*, MIT Press, 1994.
- *Computer Music Journal*, MIT Press.
- Cook, Perry (red.). *Music, Cognition and Computerized Sound*, MIT Press, 1999.
- Dodge, Charles. *Computer Music*, Schirmer Books, 1985, 1997.
- Hammer, Øyvind. *Akustikk for musikere*, NoTAM, 1994.
- Hammer, Øyvind. *Sampling og rekonstruksjon*, NoTAM, 1994.
- Moore, Richard. *Elements of Computer Music*, Prentice Hall, 1990.
- *Organized Sound*, Cambridge University Press.
- Proceedings of the ICMC.
- Roads, Curtis. *The Computer Music Tutorial*, MIT Press, 1996.
- Roads, Curtis (red.). *The Music Machine*, MIT Press, 1989.
- Roederer, Juan G. *The Physics and Psychophysics of Music*, Springer-Verlag, 1995.

- Rossing, Thomas D. *The Science of Sound*, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- Wishart, Trevor. *Audible Design*, Orpheus the Pantomime, 1994.

[Innholdsfortegnelse](#)

Jøran Rudi, joranru@notam02.no, Tel: (+47) 22 35 80 60, Mobil: (+47) 99 45 39 38
NOTAM - Norsk senter for teknologi i musikk og kunst, Sandakerveien 24D, bygg 3F, N-0473 Oslo
© Jøran Rudi. Original design av [Andreas Viklund](#).