

Menneskets stemme og fysikken bag Fysik A, Biologi B

Søren Nørgaard

December 2010

Abstract

This paper examines the sound of the human voice. It has the aim to put together relevant points in describing the way sound is produced by the voice, thereby including the human way of regulating frequency, intensity, and the timbre of the sound.

First, the different aspects of sound including frequency, intensity, and timbre, are described to look at what factors are necessary to predict a sound, and after an introduction to the different muscles and cartilages involved in sound production, the human ways of regulating these factors are explained.

The paper is mainly build upon knowledge of how a string produces sound, since this is highly comparative to the way humans do. It is explained how humans use different muscles to regulate the factors of the string that are important to its sound.

The study shows that the human is indeed able to control the factors that defines the sound. The frequency can be controlled by muscles around the Thyroid and Cricoid cartilages which are able to tilt the one away from the other, tightening the vocal cords. It also shows that by controlling our peak flow we can regulate the intensity of the sound produced. The timbre is controlled by the shape of vocal funnel thereby especially by the placement of the tongue.

The timbre is not described in detail since it is very complex to make an analogue of due to its many twists and turns. Therefore this only gives a direct way to predict the fundamental frequency of the voice and some tools for describing timbre of a simple tube or funnel. The influence of damping by gravity and the friction from the air around the vocal folds are not taken into consideration since the affect this has on the system is assumed to be small.

Indholdsfortegnelse

Indledning	2
1 Hvad er lyd?	3
1.1 Udbredelse	3
1.2 Lydfrembringelse	4
2 Hvordan fungerer stemmen?	5
2.1 Vejtrænkning	5
2.2 Strubehovedet	6
2.3 Stemmetragten	6
3 Hvordan styrer vi lyden?	8
3.1 Fundamentalfrekvens	9
3.2 Intensitet	10
3.3 Klang	10
4 Brug af stemmen	12
4.1 Frekvens	12
4.2 Amplitude	13
4.3 Sammensætning af lyd	14
Konklusion	15
Kildeliste	16

Indledning

Mennesket har gennem evolutionen udviklet sig til, at være en af den mest sociale dyrearter på kloden. Gennem mange hundrede tusinde år har mennesket brugt forskellige former for kommunikation til at fungere og arbejde sammen som en enhed.

Man mener at stemmebåndenes oprindelige funktion har været, at holde snavs væk fra luftrøret,¹ men gennem evolutionen har vi lært at bruge disse til at udvide vores kommunikationssystem.

Stemmen er således blevet vores primære måde at dele informationer og at kommunikere på, og har gjort det muligt for os, at udvikle os til intelligente væsener.

Lyd udbredes i form af bølger. Ved hjælp af stemmen kan vi ikke bare frembringe lyd, men styre den ind så den rammer bestemte frekvenser. Det har gjort os i stand til at udtrykke os musikalsk ved hjælp af stemmen, for eksempel i form af sang.

Stemmen er altså gennem evolutionen blevet specialiseret, så vi med stor nøjagtighed kan fintune den ved hjælp af kroppens forskellige muskler.

I denne opgave vil jeg undersøge stemmen som middel til at frembringe lyd ved forskellige frekvenser. Jeg vil se på hvad der karakteriserer en lyd, og derefter undersøge hvordan vi, ved brug af kroppen, kan styre disse elementer. Til sidst vil jeg så opstille nogle måder at regne på kroppens kraftpåvirkninger ved stemmebrug, og give eksempler på hvordan disse har betydning for den samlede lyd.

I opgaven vil der undervejs være kildehenvisninger til kildelisten på sidste side. Kilde henvisningerne er markeret som *superscripts*, der svarer til nummeret i kildelisten, så hvis jeg for eksempel vil lave en henvisning til bogen "Matematik i Virkeligheden", vil det se sådan ud.²

I opgaven vil jeg desuden bruge latinske betegnelser for muskler og bruske. Disse vil blive beskrevet undervejs, og vil alle være markerede på nogle tilhørende figurer, for at give overblik over musklernes og bruskenes placering og funktion.

Opbygningen er simpel: Først vil jeg give en beskrivelse af, hvad lyd i det hele taget er. Derefter vil jeg give en beskrivelse af kroppens funktioner, der involverer stemmen. Efter det vil jeg flette lyden ind i kroppens system, og forklare hvordan de tidligere beskrevne muskler osv. er med til at ændre på lyden og til sidst vil jeg regne sammen på, hvilken effekt en sammentrækning af en muskel, eksempelvis, har for lyden.

Til sidst skulle man gerne stå tilbage med et godt overblik over stemmen, og dens måde at ændre lyd på. God læsning.

Kapitel 1

Hvad er lyd?

I dette første kapitel, vil jeg give en beskrivelse af, hvad lyd er, og hvordan lyd udbredes. Det er vigtigt af forstå, hvad lyd er, og hvordan den udbredes, for senere at kunne trække ligheder til menneskets måde at gøre op med disse fysiske rammer for lydfrembringelse.

Når man vil beskrive lyd, ser man på det som bølger, ligesom lys for eksempel. Der er grundlæggende to former for bølger: Transversalbølger og longitudinalbølger. De er begge relevante for beskrivelse af lyd, men på to forskellige måder.

1.1 Udbredelse

Lyd kan udbredes i alle stoffer, hvad enten de er faste, på gas- eller væskeform. Udbredelsen er lidt forskellig alt efter hvilket stof lyden skal igennem. I gasser sker udbredelsen ved, at eksempletvis en højttalermembran skubber til luften, og derved danner et overtryk, efterfulgt af et undertryk, som membranen trækker sig tilbage. Herved dannes der bølger af overtryk og undertryk i luften, som repræsenterer den lyd der bliver gengivet. Denne form for bølger kaldes longitudinalbølger, og bølgens udsving går på langs af udbredelsesretningen, altså som skiftevis over- og undertryk i luften.

Når lyd bevæger sig i faste stoffer sker det lidt på samme måde, ved at der sker en lille sammentrykning af stoffet, som så bølger sig igennem stoffet. Denne form for sammenpresning kan både ske som sammenpresning i stoffet på langs (longitudinalbølger) eller som svingninger i materialet (transversalbølger). Man kan forestille sig stoffet som små masser, forbundet med små fjedre, så de altså både kan trykkes sammen på langs, men også svinge som en streng.⁴

Fordi lyd består af en sammenpresning, eller en svingning i et materiale, kan lyd ikke bevæge sig igennem et vakuum.

Lydintensiteten beskriver hvor højt vi oplever lyden. Intensiteten defineres som mængden af energi pr. arealenhed, der går igennem en flade der er vinkelret på udbredelsesretningen.² Når jeg senere vil tale om lyd som harmoniske svingninger, vil det være relevant at kunne beregne intensiteten for sådanne, samt at kende det minimum for intensitet, som mennesket kan opfattes. Menneskets hørbarhedsgrænse og måden man beregner intensitet for en harmonisk svingning er også opgivet i bogen "Matematik i virkeligheden":²

Menneskets hørbarhedsgrænse:

$$I_{min} = 10^{-12} \left[\frac{J}{s * m^2} \right] \quad (1.1)$$

Beregning af lydintensitet for en harmonisk svingning:

$$I = 2\pi^2 \rho_0 f^2 v A^2 \quad (1.2)$$

Hvor v er udbredelseshastigheden, ρ_0 er udbredelsesmediets massefylde, f er frekvensen og A er amplituden for signalet. Disse begreber vil blive beskrevet nærmere.

1.2 Lydfrembringelse

For at lyden kan udbredes, skal den frembringes først. Der er grundlæggende tre måder lyd kan frembringes på.

Den mest grundlæggende måde at frembringe lyd på, er ved at lade en streng svinge. Dette er nærmest en direkte analog til en harmonisk svingning (en sinusformet svingning. Se figur 1.1), og beskrives derfor som en transversal bølge, som er vinkelret på udbredelsesretningen.

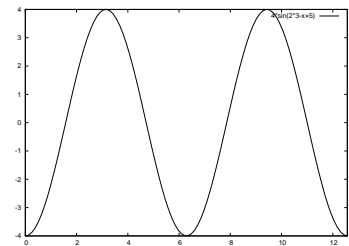
En harmonisk svingning, og derfor også en strengs svingning, beskrives på følgende form,² som en funktion med to variable, sted og tid:

$$u(x,t) = A * \sin(\omega t - kx + \varphi) \quad (1.3)$$

Hvor A , som før, er amplituden (hvor meget bølgen bevæger sig op og ned), ω er vinkelfrekvensen (hvor hurtigt bølgen svinger), k bølgetallet eller repetensen ($k = 2\pi/\lambda$, λ er bølgelængden)⁵ og φ er fasen.

Figur 1.1 er et eksempel på en harmonisk svingning, og måden en streng bevæger sig på, hvor $A = 4$, $\omega = 2$, $t = 3$, $k = 1$ og $\varphi = 5$.

En anden måde at frembringe lyd på, er ved at lade en membran vibrere. Dette skaber, som før nævnt, over- og undertryk i omgivelserne, og danner derved lyd. Det er som sagt dette der udnyttes i en højttaler, men det bliver også brugt i slagøjnsinstrumenter som trommer, hvor man slår på en membran for at sætte den i svingninger, hvorefter lyd genereres.



Figur 1.1: Harmonisk svingning

Den tredje måde, at frembringe lyd på, er som en blanding af de to ovennævnte. Det er denne måde der eksempelvis frembringes lyd i en trompet, men det er også denne måde mennesket frembringer lyd på, ved hjælp af stemmen.

Når man spiller trompet presser man sine læber sammen i mundstykket, og presser der efter luft ud igennem læberne, så de begynder at vibrere. Frekvensen de vibrerer med bestemmer således den *fundamentale* frekvens for den lyd der kommer ud af blæseren. På denne måde bestemmer vibrationerne fra læberne hvor tit der "skal lukkes luft ud", og der ved hvor tit der skal dannes overtryk i omgivelserne.

Menneskets stemmelæber eller stemmebånd fungerer på samme måde, men det vil blive beskrevet nærmere i de næste kapitler.

Kapitel 2

Hvordan fungerer stemmen?

Når mennesket skal frembringe lyd ved hjælp af stemmen, fungerer det, som før nævnt, ved at luft presses gennem stemmelæberne, som så sættes i svingninger. Jeg vil i dette kapitel forklare de dele af mennesket, der gør dette muligt. Der vil være nogle påstande i form af frekvensens afhængighed af masse og længde, som vil blive dokumenteret i et senere kapitel.

2.1 Vejrtrækning

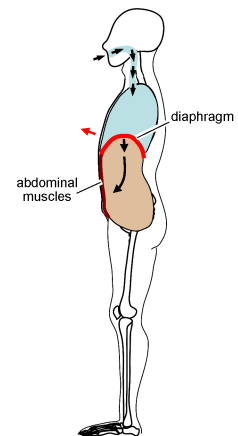
Vejrtrækningen er det første vigtige led i menneskets stemmebrug. Vejrtrækningssystemet sørger for, at der bliver skubbet luft igennem stemmelæberne, når man vil udtrykke sig vokalt.

For at trække luft ned i lungerne, skal der bruges nogle kræfter. Princippet er det, at lungerne udvides, og der derfor dannes et undertryk, som trækker luften ned i lungerne. Ved normal indånding (tidal vejrtrækning) bruges kun musklerne fra brystet til at styre lungernes rumfang,¹ da vi ved normal vejrtrækning kun skal bruge luften til iltning af blodet og ikke til mere luftkrævende ting som eksempelvis sang. Ekstra luft kan dog presses ud af lungerne ved at benytte musklerne ved bughulen (de abdominale muskler, M. Abdominalis). Når man bruger disse muskler til at exhale, siger man, at man bruger en expiratorisk reserve.

Ved sang skal der bruges langt mere luft, end den udgjort af den expiratoriske reserve og tidalvolumen, for at holde tonen. Ved at fylde sine lunger helt op med luft og exhale så meget man kan, exhalerer man sin såkaldte vitalkapacitet. Man udnytter en stor del af denne vitalkapacitet når man synger eller spiller blæseinstrumenter.¹

For at indånde mere luft end sin tidalvolumen, kan man bruge mellemgulvsmusklen, diafragma, til at udvide med en såkaldt inspiratorisk reserve, altså en mængde ekstra luft udover sin tidalvolumen. Diafragma sidder hæftet til lungernes underside (se figur 2.1). Når diafragma spændes, vil den flade ud i en retning nedad, som vist på figuren, og derved strække lungerne og skabe et undertryk, der trækker luft ned. Efter endt indånding slapper diafragma af igen, og vender tilbage til sin placering i brysthulen. Man kan således udånde hele sin vitalkapacitet, ved at bruge diafragma til aktivt at inhalere luft til lungerne er fyldte, og der efter aktivt exhale ved brug af de abdominale muskler.

Da ribbenene ikke kan kollapse fuldstændigt, vil der altid være en del luft tilbage i lungerne (ca. 1,5 liter¹). Dette kaldes residualvolumen.



Figur 2.1: Vejrtrækning¹

2.2 Strubehovedet

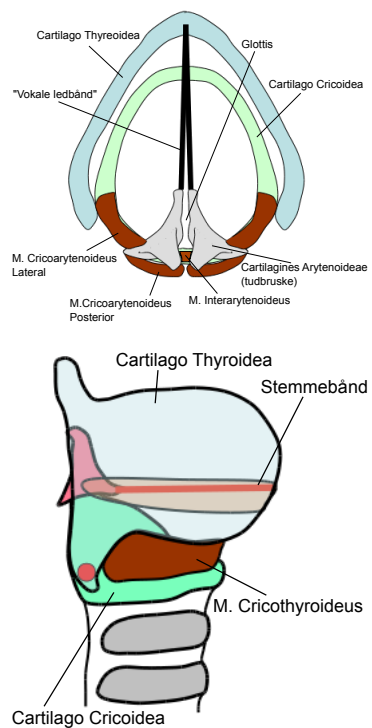
Når luften fra lungerne udåndes, passerer det gennem strubehovedet i halsen. Det er her luften sætter gang i nogle svingninger, som bliver til lyd.

Luften passere gennem stemmelæberne eller stemmebåndene, som de også kaldes, og sætter disse i svingninger. Stemmelæbernes yderste kant ("det vokale ledbånd"¹) sidder udspændt mellem de to tudbruske, Cartilagine Arytaenoideae, og forvæggen til strubehovedet, Cartilago Thyreoidea. Ét bånd sidder forbundet til hver tudbrusk. Tudbruskene kan rotere om en lodret akse, hvilket betyder, at de kan udvide eller indsnævre åbningen mellem de to stemmelæber. Denne åbning kaldes glottis.

Ud over de vokale ledbånd, som er kanten af stemmebåndet, består stemmebåndene eller stemmelæberne også af en mere massiv muskel, vocalis, som sidder på parallelt lige op ad de vokale ledbånd, og udgør resten af massen der svinger, når luft presses igennem glottis. Det er i det hele taget denne muskel der udgør resten af stemmelæben. Brugen af disse to dele af stemmelæberne, er med til at bestemme, hvilken tone der kommer ud, når man synger eller taler. Mænd har ofte længere stemmebånd end kvinder, og har derfor også en dybere fundamentalfrekvens. Man mener desuden, at mænds stemmelæber har en større densitet, hvilket også har betydning for frekvensen.

For at åbne glottis, trækker de bagerste cricoarytenoide muskler (M. Cricoarytenoideus Posterior) sig sammen. For at lukke glottis igen, er det musklerne i siden (M. Cricoarytenoideus Lateral) der trækker sig sammen, og trækker tudbruskene med sig (se figur 2.2a). Disse egenskaber er nyttige, når der skal hhv. meget eller lidt luft igennem glottis. Hvilken effekt dette har, vil blive forklaret i næste kapitel.

I sangsammenhænge er det vigtigt, at kunne regulere, hvor spændte stemmelæberne er, da dette har betydning for lydets frekvens. Musklen M. Cricothyroideus sidder mellem Cartilago Thyreoidea og Cartilago Cricoidea, således at Cartilago Cricoidea er under Cartilago Thyreoidea (se figur 2.2b). Når denne muskel trækker sig sammen, tilter den øverste del (Cartilago Thyreoidea) over det markerede punkt på figur 2.2b, mens den nedre del (Cartilago Cricoidea) bliver på sin plads. Dette får stemmebåndene til at strammes, og herved kan vi regulere frekvensen på vores stemme.



Figur 2.2: Struben¹ - a og b

2.3 Stemmetragten

Når lyden er dannet i struben, bevæger den sig op gennem svælget, og ud igennem mund og næse. For at kunne forme lyden yderligere, og, for eksempel, kunne forme ord, har vi nogle "redskaber" som vi kan gøre brug af.

Det er sammensætningen af overtoner der giver lyden sin klangfarve. Da overtoner i mennesket, som senere vil blive fysik beskrevet, dannes af stående bølger i svælg og mund, afhænger klangen, som ved en orgelpibe, af afstanden mellem lydkilde og udmundning (stemmelæber og læber). Mennesker kan regulere denne afstand, ved at hæve eller sænke strubehovedet. Det er musklerne M. Sternothyroideus og M. Thyrohyoideus⁶ der kan hhv. hæve og sænke strubehovedet, men det vil jeg ikke komme nærmere ind på.

Læberne kan også bevæges en smule ud og ind, hvilket også kan afkorte afstanden mellem lydkilde og udmunding.

Stemmen kan selvfølgelig ikke helt sammenlignes med orgelpibe, efter som lyden jo møder nogle skarpe knæk på vejen. Tungen i sig selv giver "tragten" en helt speciel form, som fremhæver visse overtoner i lyden, og har enorm betydning for dennes klangfarve.¹

Kapitel 3

Hvordan styrer vi lyden?

For at beskrive hvordan mennesket styrer den lyd der bliver dannet, er det nødvendigt at se på, hvilke variabler der findes, når man snakker om lyd. For at tage det simpleste eksempel, kan vi se på formen en harmonisk svingning er skrevet på (ligning 1.3), og se hvilke variabler der har betydning for lyden.

$$u(x,t) = A * \sin(\omega t - kx + \varphi) \quad (1.3)$$

Den første variabel, er amplituden A . Som det ses i ligning 1.2 i første kapitel, afhænger amplituden af materialet lyden bevæger sig i (ρ_0 , v), af frekvensen f og af intensiteten I . Da sang oftest foregår i atmosfærisk luft, har vi allerede værdierne ρ_0 og v (de kan i hvert fald let beregnes), og variablerne for amplituden er således f og I .

Går vi videre ind i ligningen kommer vi til ω og t . ω kaldes også den cykliske frekvens,⁴ eller vinkel-frekvensen, og bestemmer hvor hurtigt en bølgen svinger, da den er faktor for tiden t . Da frekvensen er med til at karakterisere lyden, er dette led vigtigt for lyden. Vi kan beregne den cykliske frekvens således:⁸

$$\omega = 2\pi f$$

Næste led i ligningen er $k * x$. k er som sagt bølgetallet, som afhænger af bølgelængden. Denne faktor kan vi få til at gå ud, ved hele tiden at observere funktionen fra punktet $x = 0$, hvilket vi uden videre kan gøre, da placeringen for observationen af bølgen ikke er vigtig for lyden.

Det sidste led φ er fasen. Dette er en målestok for "hvor langt inde i bølgen" vi starter vores svingning. Dette har heller ikke direkte noget med lydets kvalitet at gøre, så dette kan også udelades i beskrivelse af en lyd.

Vi kan derfor skrive en ny ligning op for fundamentalsvingningen, som kun afhænger af elementer der karakteriserer lyden:

$$U(t) = A * \sin(2\pi * f * t) \quad (3.1)$$

Med amplituden omskrevet fra ligning 1.2:

$$A = \sqrt{\frac{I}{2\pi^2 \rho_0 * f^2 * v}} \quad (3.2)$$

Ud fra dette kan vi se, at i beskrivelsen af stemmens fundamentalfrekvens, er der to variabler vi skal kunne variere, for at ændre den harmoniske svingning $U(t)$.

Ud over den basale fundamentale frekvens for vores stemme, skal vi også kunne variere overtoner, for at ændre klangen af vores stemme. I dette kapitel vil jeg beskrive hvordan vi, ved hjælp af dele af kroppen beskrevet i forrige kapitel, kan ændre på disse tre vigtige variabler for lyden af vores stemme.

3.1 Fundamentalfrekvens

Fundamentalfrekvensen, som efterhånden har været nævnt nogle gange, er den grundlæggende frekvens, hvis vi vil synge en tone. Det er på den frekvens vi eksempelvis skelner mellem tonerne på et klaver.

Da stemmebåndene, som nævnt i første kapitel, fungerer på næsten samme måde som en streng, mht. frembringelse af lyd, vil jeg beskrive hvordan fundamentalfrekvensen for en streng bestemmes.

Der er flere elementer der bestemmer frekvensen for en streng. Formlen for dette er givet således:¹⁰

$$f_n = \frac{n}{2 * L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (3.3)$$

Hvor n er et heltal, der bestemmer hvilken overtone vi vil have frekvensen for. Ved fundamentalfrekvensen er denne $n = 1$. $L = \lambda/2$, altså længden af strengen der vibrerer. T er den kraft strengen er spændt med, og $\mu = m/L$, masse pr. længdeenhed også kaldet den lineære densitet.

For at regulere fundamentalfrekvensen, skal vi altså enten kunne regulere længden af strengen, spændingen af strengen eller massen af den vibrerende streng.

Det første vi kan gøre for at regulere frekvensen er, at regulere spændingen. Dette klares, som før beskrevet, af musklen M. Cricothyroideus, som tilter strubehovedets forreste bruske nedad, og strækker stemmebåndene (figur 2.2b). En forøgelse i spændingskraft, T , har den effekt at stemmen blev højere, og dermed altså en højere frekvens.

Når stemmebåndene strammes, bliver længden af dem også lidt større, hvilket, i følge vores ligning 3.3, har den modsatte effekt af stramningen, nemlig at sænke frekvensen. Der er dog en grænse for hvor lange båndene kan strækkes, og derfra vil spændingen stige, uden længden ændres særlig meget. Derfor kan vi, i et vist omfang, se bort fra længdefaktoren når vi regner på stemmebåndene.

Det sidste element, den lineære densitet μ , skulle man ikke umiddelbart tro vi kunne ændre. Det kan imidlertid godt lade sig gøre. Vi ændrer naturligvis ikke massen af stemmebåndene, men der imod massen af den vibrerende del af stemmebåndene. Altså ændrer vi hvilken del af stemmebåndet der vibrerer!

Ved sang i de dybere toner, der ligger nærmest sin stemmes fundamentalfrekvens (det modale register), vibrerer stort set hele stemmelæben, altså både vocalismusklen og det vokale ledbånd, der udgør kanten ud mod glottis. Derved er hele massen af stemmelæben i svingninger, når man synger i dette "register". Hvis man der imod går op i et højere toneleje (falsetregsitret), vil kun en mindre del af vocalis vibrere, og tonen skabes derfor hovedsageligt af det vokale ledbånd. Derved er massen mindre, og tonen bliver højere (se ligning 3.3).

Forskning viser,¹ at reguleringen musklerne der har betydning for frekvens, rent faktisk sker før lyden kommer ud af munden. Reguleringen sker derfor ikke udelukkende ved hjælp af hørelsen, men også andre elementer spiller ind. Wykes teori¹ giver tre bud på mulige "sensorene", der kan hjælpe os med at intonere indenfor få cykler af lyd. Første involverer sensorsignaler fra strubehovedets egne muskler, den anden receptorer i slimhinden omkring Cartilagine Arynoidae og den tredje involverer de sensorsignaler der har at gøre med strubehovedets placering i halsen. Jeg vil bare nævne dette, for at give bedre forståelse, men ikke gå mere i dybden, da man ikke ved præcis hvilket feedbacksystem vi bruger til at forberede strubehovedet til sang.

3.2 Intensitet

Nu er det beskrevet hvordan vi regulerer frekvensen i strubehovedet. Nu mangler vi bare intensiteten for at have beskrevet reguleringen af fundamentalkurven for en lyd vi frembringer (ligning 3.1).

Intensiteten er et mål for den energi der er i lyden, altså lydstyrken. Man deler ofte intensitet og lydstyrke (I og L) op, så enheden for "intensiteten" er J/sm^2 og enheden for lydstyrke (som man bruger i daglig tale), er dB (deciBell).

For at regne fra den ene enhed til den anden bruger man følgende ligning:

$$L = \log \frac{I}{I_{min}} \quad (3.4)$$

hvor I_{min} er den mindste lydintensitet vi kan opfatte (se ligning 1.1).

Reguleringen af intensitet afhænger af vores såkaldte *peak flow*.¹ Peak flow er

"Den maximale lufthastighed under forceret udånding"³

Der er en lineær sammenhæng mellem peak flow og lydintensitet: En fordobling i peak flow giver omkring 9 dB større lydstyrke.¹ Ved en sådan forøgelse vil lydstyrken af de højere overtoner stige endnu mere end fundamentalfrekvensen. Et eksempel fra "The Biology of Musical Performance"¹ er, at hvis en barytonsanger forøger en fundamentalfrekvens på 600Hz med 10dB, vil overtonen ved 3kHz stige med 16dB. Sammensætningen af overtoner vil blive beskrevet lidt senere.

Når vi synger skiftevis åbner og lukker glottisåbningen. For at øge peak flow, og derved intensiteten, skal vi lukke samme mængde luft igennem, men åbningen og lukningen skal ske hurtigere, som intensiteten øges. Stemmehæberne skal derfor strammes mere, så der skal et større lufttryk til at åbne glottis. Når glottis så åbnes, og har lukket en bestemt mængde luft igennem, lukker den igen hurtigere, da stemmelæberne er strammet mere end før.

Da stramningen af stemmebåndene jo, som før beskrevet, er med til at regulere frekvensen, må frekvensen modjusteres, for at synge med samme frekvens ved en højere lydstyrke. Stramningen af stemmebåndene klares, som sagt, af M. Cricothyroideus, så for at holde fundamentalfrekvensen må man justere på de muskler der justerer sammenpresningen af stemmelæberne (M. Cricoarytenoideus).

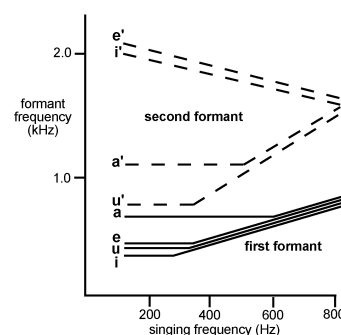
3.3 Klang

Nu er alle de "nødvendige" begreber forklaret, i den forstand, at vi nu kan regulere alle variablerne i ligning 3.1 ved hjælp af vores stemme. Det eneste der ikke er taget højde for, er tonens klangfarve.

Grunden til, at vi kan høre, for eksempel, hvilket instrument der spiller en bestemt tone er, at lyden netop ikke kun består af en enkelt frekvens. Som det ses i ligning 3.3, er der plads til at variere "overtonetælleren" n .

Et instrument eller en stemmes klang bestemmes nemlig af hvilke overtoner der klinger ud over fundamentalfrekvensen, og hvor stor lydstyrken er for disse enkelte frekvenser.

Den resulterende lyd findes ved at lægge alle disse enkelte frekvenskurver sammen. Hvis vi siger at der findes en ligning 3.1 for hver n værdi fra ligning 3.3, ser den samlede lydbølge således ud:



Reproduced with permission from Sundberg 1978

Figur 3.1: Vokaler¹

$$f(x) = \sum_{n=1}^n f(x)_n \quad (3.5)$$

Frekvenserne for disse overtoner bestemmes ved at gange n -faktoren ind i den cylindriske frekvens ω i ligning 1.3. Første overtones cylindriske frekvens er således $\omega_1 = 2 * \omega$, anden overtones cylindriske frekvens er $\omega_2 = 3 * \omega$ osv.

Klangen for en bestemt stemme eller et bestemt instrument afhænger her efter af, hvor stor lydstyrken for de enkelte overtoner er. Hvis vi for eksempel udtaler vokalen "i", vil en højere overtone være intensiv, end hvis vi udtalte vokalen "u" (se figur 3.1).

For at ændre klangen på sin stemme, må man, som beskrevet i forrige kapitel, ændre formen på den vej, lyden skal tilbagelægge på vej fra stemmelæber til læber. Alene ved at ændre mundhulens form, kan en mandlig sanger placere første overtone hvor som helst mellem 700 og 2500Hz, hvilket er effektivt, når man skal udtrykke forskellige lyde.¹

Overført til fysikken kan dette forklares ved at se på stående bølger i et rør.

Hvis man puster hen over toppen af et rør, dannes der stående bølger i røret. Ligesom ved strengen afhænger disse af rørets facon. Sådan beregnes frekvensen for tonerne der dannes i et rør:²

$$f = \frac{1 + 2n}{4L} * v \quad (3.6)$$

hvor n igen er "overtonetæller", L er rørets længde og v er lydens hastighed i luft eller et andet medie.

Vi kan altså se at længden af røret er med til at bestemme hvilken tone der dannes.

Når lyden bevæger sig ud fra stemmelæberne, og op imod læberne, kan man ikke se "tragten" som et enkelt rør, men som en sammensætning af mange rør, vi kan regulere som det passer os. Vi har mulighed for at gøre bestemte dele af tragten større eller mindre efter behov, og derved styre, hvilke toner og overtoner der bliver adderet til den samlede lyd af vokalen. En ændring af et "rørs" størrelse kan blandt andet foretages af tungen, som kan fylde mere eller mindre af mundhulen, og derfor give mere eller mindre plads til, at lyden kan trænge igennem.

På den måde kan vi altså bestemme med stor nøjagtighed, hvordan lyden kommer ud af vores mund.

Kapitel 4

Brug af stemmen

Nu er det blevet beskrevet, hvad lyd er, hvilke dele af kroppen der er i brug når vi bruger stemmen og hvordan disse kropsdele bestemmer lyden af vores stemme. Vi skal nu se nogle eksempler på brug af stemmen, for at vi kan se, hvordan kroppen ændrer en lyd. Jeg vil nu opbygge en analog af menneskets stemme, som vi kan regne på, for derved at se på stemmens egenskaber, når den er i brug. Jeg vil vise hvordan frekvens og amplitude for ligning 3.1, som vi tidligere fandt, reguleres af kroppen, og give eksempler på, hvordan vi kan opnå forskellige lyde ved brug af stemmen.

$$f(t) = A * \sin(2\pi * f * t) \quad (3.1)$$

4.1 Frekvens

Det første vi vil gøre, når vi skal skabe en lyd, er, at bestemme hvilken tone vi vil frembringe, altså bestemme frekvensen. Det bruger, som tidligere nævnt, denne ligning til:

$$f_n = \frac{n}{2 * L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (3.3)$$

For at gøre det simpelt, vil vi beskrive frekvensen, hvor det eneste der ændrer sig er spændingen for stemmebåndet, T . Derfor må vi lade den lineære densitet μ og længden L være konstante. I et typisk eksempel for stemmelæberne på en mand,⁷ bruger vi værdierne:

$$\begin{aligned} \mu &= 0,006 [kg/m] \\ L &= 0,004 [m] \end{aligned}$$

Vi lader værdien "overtonetælleren" være $n = 1$, da vi i første omgang vil finde fundamentalfrekvensen for en mand med givne værdier.

Vi har nu kun en variabel i vores ligning, spændingen T , og kan derfor opstille spændingskraften T som funktion af frekvensen f (og overtonetælleren n).

$$f = \frac{n}{2 * 0,004} \sqrt{\frac{T}{0,006}} \rightarrow T(f, n) = \frac{3,84 * 10^{-7} * f^2}{n^2} \quad (4.1)$$

Ved at variere n kan vi således også få frekvensen for overtonerne. På figur 4.1 ses fundamental-frekvensen samt de tre første overtoners frekvenser afbilledet.

Ud fra denne funktion kan vi, for eksempel, beregne, hvor stor en spænding der skal til for at frembringe en tone på 440Hz som fundamental-frekvens:

$$T(f,n) = \frac{3,84 * 10^{-7} * 440^2}{1^2} = 0,0743424 [N] \quad (4.2)$$

Hvis man så tilsvarende skulle have en overtone en oktav over, på 880Hz, ville vi forvente samme spænding, da det jo er første overtone ($n = 2$), for den dobbelte frekvens ($880 = 2 * 440$):

$$T(f,n) = \frac{3,84 * 10^{-7} * 880^2}{2^2} = 0,0743424 [N] \quad (4.3)$$

Hvilket jo "stemmer".

4.2 Amplitude

Nu mangler vi bare at bestemme amplituden, for at have alle elementer til ligning 3.1.

Vi har allerede fundet ud af, i ligning 3.2, at vi bare skal bruge intensiteten I , for at bestemme amplituden. De andre værdier afhænger af materialet lyden bevæger sig i. Da vi oftest taler eller synger i atmosfærisk luft, er disse værdier givet således ved 20°C:⁹

$$v = 344 [m/s] \quad (4.4)$$

$$\rho_0 = 1,2 [kg/m^3] \quad (4.5)$$

Da vi nu kun har to variable (I og f) for amplituden A , kan vi regne resten sammen til en konstant for de givne forhold, og derved nå frem til følgende funktion for amplituden:

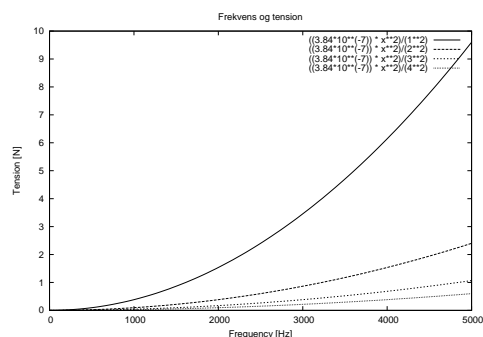
$$A(I,f) = \sqrt{\frac{I}{8148,3 * f^2}} \quad (4.6)$$

På figur 4.2 er amplituden afbilledet som funktion af intensiteten, på logaritmisk skala.

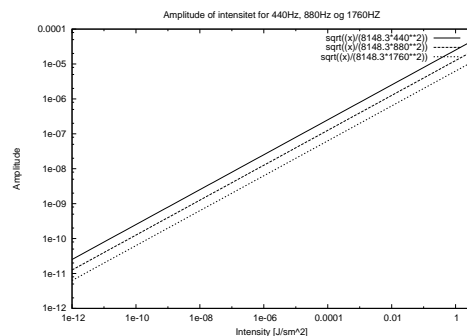
Vi kan igen beregne, hvor stor amplituden ville være, hvis vi skulle have en frekvens på $f = 440Hz$ ved, for eksempel, $I = 60dB = 10^{-6} J/sm^2$:

$$A(10^{-6},440) = \sqrt{\frac{10^{-6}}{8148,3 * 440^2}} = 7,96 * 10^{-8} \quad (4.7)$$

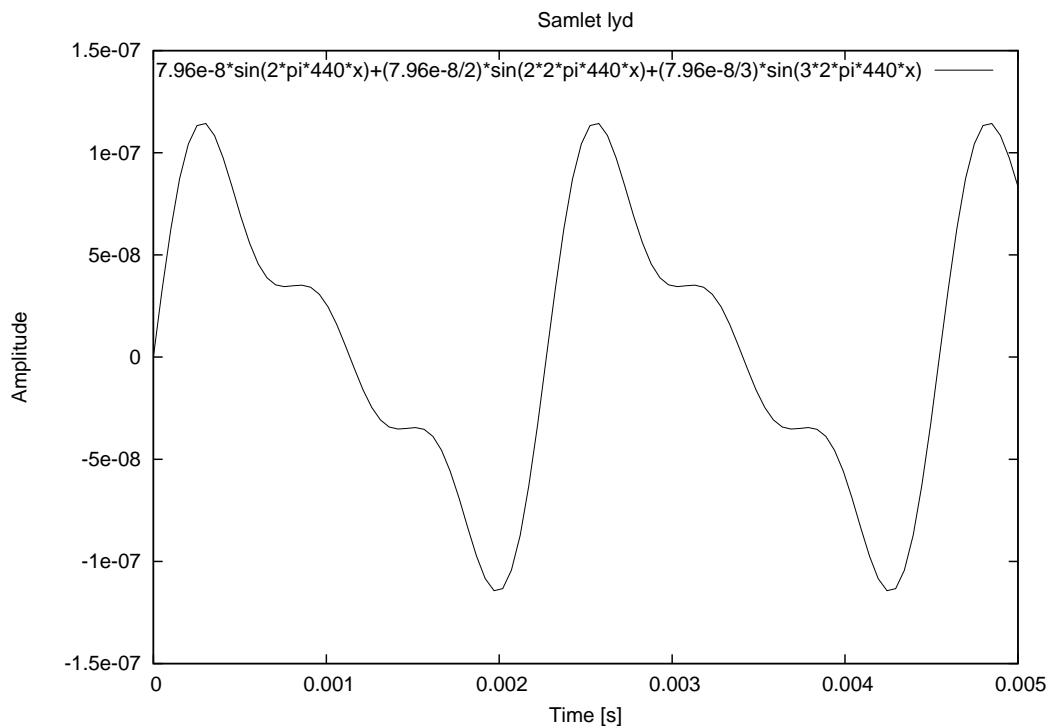
Nu har vi beskrevet hvilke menneskelige egenskaber og kræfter der skal til for, at vi kan frembringe en bestemt tone.



Figur 4.1: Spænding/Frekvens



Figur 4.2: Amplitude/Intensitet



Figur 4.3: Amplitude/Intensitet

4.3 Sammensætning af lyd

Lad os nu prøve at sammensætte en samlet lyd, som består af fundamentalfrekvensen 440Hz, og de to første overtoner, hvor amplituden for fundamentalfrekvensen er $A = 7,96 \cdot 10^{-8}$, og amplituden for de to overtoner er henholdsvis $\frac{A}{2}$ og $\frac{A}{3}$ for første og anden overtone.

Fundamentalfrekvensen, $U_1(t)$ er da således:

$$U_1(t) = 7,96 \cdot 10^{-8} \cdot \sin(1 \cdot 2\pi \cdot 440t) \quad (4.8)$$

Første overtone kan så findes ved at gange vinkelfrekvensen (afsnit 3.3), altså leddet $2\pi \cdot f$, med 2. Amplituden har jeg som sagt sat til at være $\frac{A}{2}$, men den kunne lige så godt være en hvilken som helst anden størrelse, da størrelsen af overtonernes intensitet bestemmer klangen for stemmen, og er helt forskellig fra instrument til instrument, fra stemme til stemme.

$$U_2(t) = \frac{7,96 \cdot 10^{-8}}{2} \cdot \sin(2 \cdot 2\pi \cdot 440t) \quad (4.9)$$

Anden overtone bestemmes på samme måde

$$U_3(t) = \frac{7,96 \cdot 10^{-8}}{3} \cdot \sin(3 \cdot 2\pi \cdot 440t) \quad (4.10)$$

For at bestemme den samlede lyd, lægges de tre bølger sammen (ligning 3.5)

$$U(t) = U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) \quad (4.11)$$

Det giver figur 4.3.

Konklusion

Målet med opgaven var, at give et indblik i menneskets stemmefunktion, måden lyd frembringes ved hjælp af denne.

Jeg har fundet frem til nogle ligninger, der bruges til beskrivelse af bevægelsen for en streng, og trukket analogier herfra over i måden stemmen virker på. Herved har jeg givet en måde at regne med stemmebåndenes spænding i forhold til hvilken frekvens eller tone der skal frembringes.

Jeg har forklaret hvordan muskler omkring stemmebåndene er med til at regulere denne spænding, og hvad der skal til for at øge lydstyrken i forhold til vores stemme. Desuden er det blevet forklaret, hvordan vi ændrer på klangen af vores stemme, så vi kan forme forskellige vokaler, ved at ændre på vores stemmetragt.

I opgaven er der fundet frem til en måde at beskrive en kontinuerlig lyd. Der er altså ikke taget højde for det begreb, man i forhold til strenge kalder *damping*, altså hvordan friktionsmodstand fra luften og tyngdekraften bevirker strengen eller stemmebåndet efter svingningen er sat igang. Det er ikke sikkert dette har stor betydning for stemmen, der jo vibrerer som følge af en kontinuerlig påvirkning af et lufttryk fra lungerne, men der er i hvert fald ikke taget højde for det her.

I analogimodellen er der heller ikke taget højde for stemmebåndenes elasticitet, som gør, at stemmebåndenes længde øges en smule, som spændingen stiger over dem. En øgning i længde har, som beskrevet i opgaven, den modsatte effekt af en øgning i spænding, hvilket gør at frekvensen må overspændes en smule i forhold til min ligning, for at modvirke den forøgelse der sker i længde. Jeg skønner dog ikke at denne længdeændring har stor betydning, og har derfor ikke taget højde for den i opgaven.

Lyden fra stemmen kan nu bestemmes ved at sammensætte de forskellige ligninger jeg har fundet frem til. Det sværeste er at bestemme klangen, da det vil kræve at man kender målene og sammensætningerne af "små rør" i stemmetragten. Det vil være et meget stort projekt at opstille en præcis funktion for lyden skabt af et menneske, da menneskets stemmetragt er så fleksibel og nøjagtigt sat sammen, at man med minimale kræfter kan ændre en lyd radikalt. Man vil der imod kunne bestemme den fundamentale frekvens, ved at måle på spændingen af stemmebåndene.

Dette er blot springbrættet for en fysisk beskrivelse af menneskets stemme, som man ville kunne udbygge ved at regne mere på stemmetragtens måder at påvirke stemmen, og der ved få et billede af stemmens måde at ændre lyd på. Det ville være en naturlig udbygning til dette projekt.

Kildeliste

- [1] Alan H.D. Watson. *The Biology of Musical Performance and Performance-Related Injury*. Scarecrow Press Inc., 2009.
- [2] Allan Baktoft. *Matematik i virkeligheden*. Forlaget Natskyggen, 2010.
- [3] B. Zetterberg og B. Lindsbog. *AZ Medicinsk Ordbog*. Medicinsk Forlag, 1986.
- [4] Erik Øhlenschläger. *Grundlæggende Fysik*. Gyldendal, 1988.
- [5] J. Falnes og K. Budal. *Bølgjelære*. Tapir, 1979.
- [6] John M. Palmer. *Anatomy for Speech and Hearing*. Williams & Wilkins, 1993.
- [7] K.N. Stevens. *Acoustic Phonetics*. MIT Press, 2000.
- [8] N.H. Fletcher og T.D. Rossing. *The Physics of Musical Instruments*. Springer, 1998.
- [9] Per Holck, Jens Kraaer og Birgitte Merci Lund. *Orbit B htx*. Systime, 2005–2009.
- [10] R.A. Serway og J.W. Jewett. *Principles of physics: a calculus-based text*. vb. 1. Brooks/Cole, 2006.