



2.8

En mur af lyd

Et amerikansk militærfly bryder gennem lydturen under en øvelse. Der lyder et øredøvende brag, og trykforøgelsen efter braget får luften omkring flyet til at fortættes til en sky af små vanddråber. Nu tænker I nok: Hvor langt oppe i atmosfæren ligger den usynlige lydture? Og svaret er: Den ligger overalt. Lydturen er nemlig ikke en mur i almindelig forstand. Lydturen er blot et udtryk for, at flyets fart bliver større end lydens fart. Men hvor hurtigt bevæger lyden sig da, siden vi kan flyve hurtigere end den?

Her lærer du mere om

- Bølger 213
- Bølgers udbredelse 214
- Interferens 218
- Dopplereffekt 226



Fig. 2.62 Normalt kan lydbølger ikke ses, men kun høres. Ved hjælp af en speciel teknik er det muligt at se lydbølgernes fortyndinger og fortætninger af luften.

Lyd er bølger

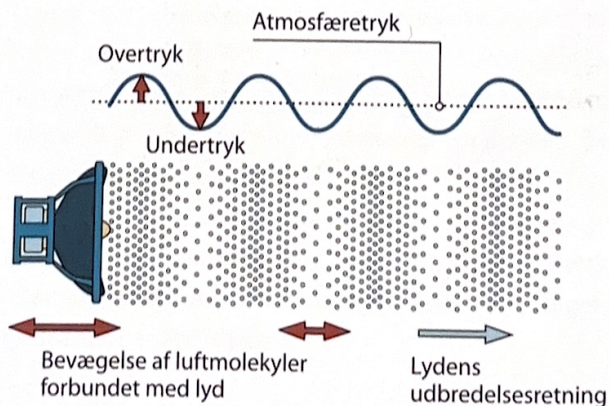
Når lyd kommer ud af en højttaler, sker det ved, at en membran i højttaleren bevæger sig frem og tilbage. Når membranen bevæger sig frem, skubber den luftmolekylerne foran sig tættere sammen, mens den tynder ud i dem, når den bevæger sig tilbage ind i højttaleren. Forstyrrelsen af luftmolekylerne forplanter sig som en bølge gennem luften ved sammenstød mellem luftmolekyler længere og længere væk fra højttaleren. Bølgen rammer øret, som er indrettet, så det kan omsætte forstyrrelsen til vores opfattelse af lyd.

De enkelte luftmolekyler vil bevæge sig frem og tilbage i samme retning, som lydbølgen udbreder sig. Lyd er derfor *længdebølger*.

Lydens udbredelsesfart

Lydens bølgelængde er afstanden mellem to bølgetoppe i lydbølgen. En graf med lydstyrken på y -aksen og strækningen på x -aksen giver et billede af den velkendte periodiske svingning.

Fig. 2.63 Højttalerens bevægelser skaber de fortyndinger og fortyndinger, der opfattes som lyd.



Lydens fart ved 20 °C

Vand	1482 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Stål	5190 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Fig. 2.64 Lydens fart i udvalgte stoffer.

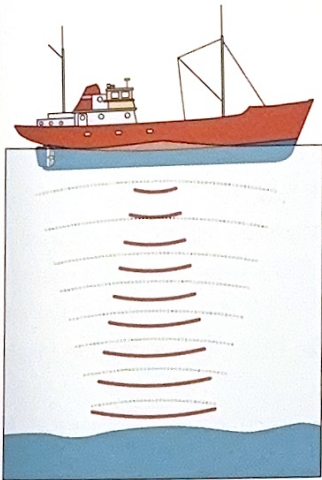


Fig. 2.65 Princippet i et ekkolod.

Lydbølgens udbredelsesfart i atmosfærisk luft ved stuetemperatur er $343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Det er det samme som næsten $1235 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Hvis temperaturen øges, vil luftens molekyler bevæge sig hurtigere, og kollisioner mellem luftens molekyler vil ske oftere. Derfor øges lydens udbredelsesfart, når temperaturen stiger.

Det er muligt for mennesket at bevæge sig hurtigere end lydens fart. Det er altså muligt at indhente sin egen lyd, hvilket netop er det, som sker, når man bryder lydmuren. Når jetjageren brager gennem lydmuren, har den altså en fart på omkring $1235 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, afhængig af temperaturen i luften.

I væsker og faste stoffer har lyden en noget større udbredelsesfart end i luft. I vand er udbredelsesfarten cirka 4 gange så stor som i luft. Den store fart skyldes, at molekylerne i væsker og faste stoffer ligger tættere på hinanden, og de kan derfor hurtigere sætte hinanden i svingninger.

Lydens fart er et nyttigt redskab!

Efter dampskibet Titanics forlis ved mødet med et isbjerg i 1912 satte den tyske fysiker Alexander Behm sig for at udvikle en måde, hvorpå han, inden en kollision, kunne spotte isbjerge fra skibe. Han fandt frem til ekkolodet, som ganske vist var dårligt til at spotte isbjerge, men som viste sig at være et fantastisk værktøj til at måle havdybder og finde fisk med!

Grundprincippet bag ekkolodet er, at lydbølger, som sendes ned mod bunden, reflekteres, når de rammer bunden. Hvis man kender lydens fart i vand, kan man finde afstanden til bunden ved at måle forsinkelsen af det tilbagekastede lydssignal. Man skal dog huske at dividere med to – overvej selv hvorfor!

Mål lydens fart i luft

Lydens fart i luft kan for eksempel bestemmes ved at kaste en basketball hårdt ned i jorden og lade en iagttager et stykke derfra måle tiden, fra hun ser bolden ramme jorden, til hun hører lyden fra sammenstødet.

- Bestem lydens fart ved brug af ovenstående metode og sammenlign den fundne værdi med tabelværdien. Overvej, om det er en præcis måde at bestemme lydens fart på.

Ovenstående metode til bestemmelse af lydens fart i luft kan forbedres ved at kaste bolden i jorden i en fast, ikke for langsom, rytme. Iagttageren går baglæns væk fra bolden, hvorved hun hurtigt oplever, at lyden ikke høres, når bolden ses at ramme jorden. Iagttageren skal nu trække sig så langt væk fra bolden, at hun ser bolden ramme jorden på samme tid, som hun hører lyden fra sammenstødet: Den forsinkede lyd passer nu med synet af boldens næste stød mod jorden.

- Bestem lydens fart ved brug af den forbedrede metode og sammenlign den fundne værdi med tabelværdien. Overvej, hvorfor denne metode er forbedret i forhold til den første metode.
- Bestem lydens fart ved hjælp af et klaptræ og en impulstæller, der aktiveres af to mikrofoner.



En gammel huskeregel siger, at afstanden til et tordenvejr kan findes ved at tælle antal sekunder, fra man ser et lyn, til man hører tordenskraldet, og dividere dette antal med tre. Så har man afstanden i kilometer. Kan denne huskeregel virkelig passe?



Fig. 2.66 Flagermus orienterer sig ved ekkolokalisering.



Hvad ville der ske på figur 2.67, hvis ambulancen kører med $1255 \frac{\text{km}}{\text{h}}$?

Fig. 2.67 Dopplereffekten for en ambulance.

Lyd har en frekvens

Et ungt menneske kan høre frekvenser fra cirka 20 Hz til 20.000 Hz. 20 Hz lyder som en dyb brummen, mens 20.000 Hz mildt talt er en lys tone. Ved de højeste frekvenser sættes det inderste af øret til at svinge frem og tilbage 20.000 gange i sekundet! Jo ældre vi bliver, desto dårligere bliver vi til at høre både høje og lave frekvenser.

Lydbølger med frekvenser højere end 20.000 Hz kaldes *ultralyd*.

Flagermus benytter eksempelvis lyde i dette frekvensområde til at orientere sig. De benytter samme metode som et ekkolod – flagermus må altså være gode til at dividere med to!

Til bords med en videnskabsmand!

Den italienske videnskabsmand Galileo Galilei (1564-1642), der regnes for en af grundlæggerne af den moderne naturvidenskab, var en aften ved at spise. Pludselig kom han til at skrabe kniven hen over sin metal-tallerken, så det gav en høj hvinende lyd – *iihh*. Men i stedet for at græmmes ved den høje lyd, lagde han mærke til, at kniven havde lavet rytmiske mærker på hans tallerken.

Han gentog det smertefulde eksperiment flere gange og fandt ud af, at afstanden mellem knivens mærker hang sammen med tonehøjden af den lyd, som blev frembragt. Han havde dermed fundet ud af, at det er frekvensen, hvormed den lydgivende genstand svinger, som bestemmer tonehøjden af den udsendte lyd.

Lydgiver i bevægelse

Hvis I passerer en ambulance med udrykning, kan I tydeligt høre, hvordan dens toneleje pludselig falder, når den kører forbi. Lyden bliver dybere. Ambulancen udsender selvfølgelig den samme tone hele tiden, men I vil høre en anden tone end den udsendte. Fænomenet kaldes *dopplereffekt* og optræder, når en lydgiver og en iagttager bevæger sig i forhold til hinanden.

Dopplereffekt anvendes blandt andet på sygehuse til ultralydsskanning i undersøgelser af blodårer. Blodårerne undersøges for reduceret eller





Fig. 2.68 Politiet udnytter dopplereffekten i deres fartkontrol.

blokeret blodgennemstrømning, det vi til dagligt kalder blodpropper. Dette er muligt, fordi blod i bevægelse reflekterer ultralyden med en anden frekvens end den oprindelige, afhængigt af om blodet strømmer til eller fra ultralydssenderen. Princippet er fuldstændig det samme som i tilfældet med ambulancen bortset fra, at blodet altså reflekterer ultralyden.

At dopplereffekten også virker på reflekterede bølger benytter politiet sig af i deres fartkontrol. Det er dog ikke ultralyd, men elektromagnetiske bølger, man benytter.

Fart afhængig af frekvens?

- Diskutér om lydets fart afhænger af lydets frekvens? Overvej jeres svar i forhold til, hvordan en person i stor afstand fra en scene vil opfatte musikken fra en koncert, hvis toner med forskellig frekvens udbreder sig med forskellig fart.
- Design og udfør et eksperiment, som kan teste jeres hypotese.

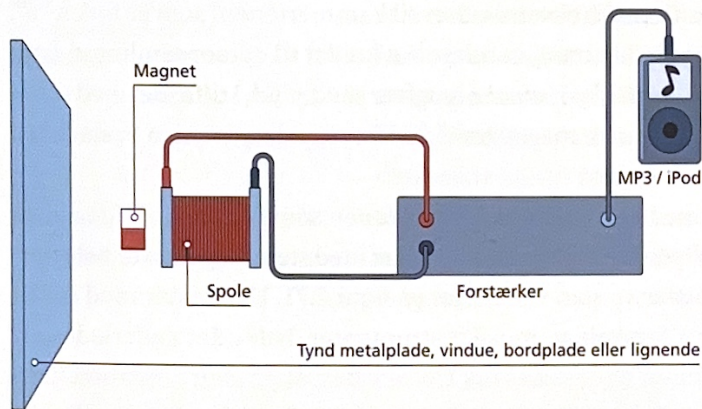


Fig. 2.69 Byg jeres egen højttaler. Magnet og spole skal sammen presses ind mod membranen.

Lav jeres egen højttaler

I skal efter nedenstående opskrift bygge en helt simpel højttaler med en spole, en kraftig magnet og en selvvalgt højttalermembran:

- Vælg en "membran". Det kan være et bord eller andet i jeres omgivelser.
- Tilslut en mp3-afspiller til en spole gennem en forstærker.
- Pres spolen med magneten i ind mod "membranen". Nu kan lyden høres fra membranen. Sæt eventuelt øret tættere til "membranen".
- Hvilken "membran" i jeres omgivelser fungerer bedst?

Sonar

Sonaren blev oprindeligt fremstillet til at afsløre undervandsbåde og kan betragtes som et avanceret ekkolod. Sonarmetoden går ud på, at der udsendes en lydbølge, som vil reflekteres, når den rammer en genstand i vandet. Ud fra kendskab til lydets fart i vand kan man beregne afstanden til den genstand, der reflekterer lyden.

Fra en fiskekutter sender en sonar lydbølger ned mod havbunden.

Bølgerne bliver reflekteret af en fiskestime og af havbunden. De reflekterede signaler modtages efter henholdsvis 15 ms og 25 ms. I vand bevæger lyden sig med farten $1482 \frac{m}{s}$.

- Hvor stor er afstanden til havbunden?
- Hvor stor er afstanden til fiskestimen?

Fra et skib, der ligger 1,0 km forude, lyder der pludseligt et højt knald fra udstødningen.

- Hvor lang tid går der, inden fiskene hører lyden?
- Hvor lang tid går der, inden man hører lyden på fiskekutteren?

Kommentér resultatet.

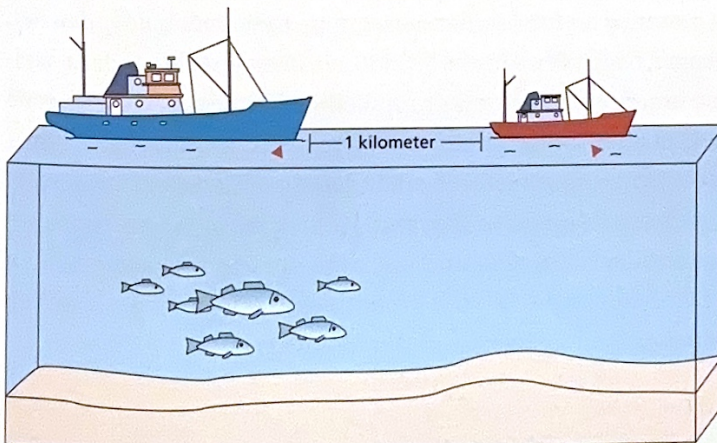


Fig. 2.70



2.9

Overtoner – lydens farve!

Forestil jer Deep Purple nummeret *Smoke on the Water* spillet på harpe, tuba eller måske banjo! Ingen tvivl om, at I ville kunne høre forskel fra originalens "støjende" elektriske guitar. Men hvordan kan det egentlig være, når det er præcis de samme toner, der spilles?

Her lærer du mere om

- Bølger 213
- Bølgers udbredelse 214
- Interferens 218
- Overtoner 228

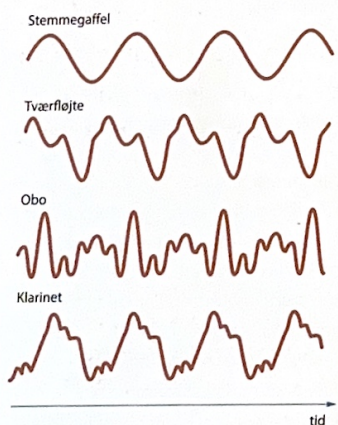


Fig. 2.71 Lydbølgers lydstyrke som funktion af tiden ses her for en stemmegaffel, en tværføjte, en obo og en klarinet.

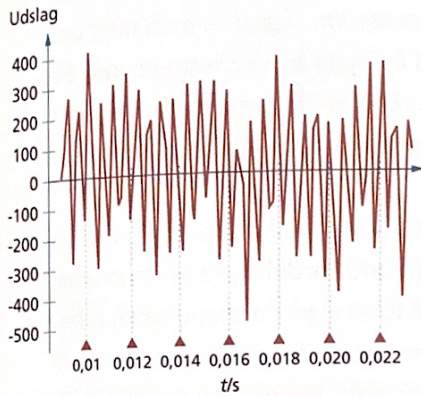
Toner og overtoner

Musik består ikke af tilfældige lydbølger, men af toner. En stemmegaffel er designet til at frembringe en bestemt tone, eksempelvis med frekvensen 440 Hz. Denne frekvens svarer til kammertonen, som er tonen "a". Ved at optage lyden med en mikrofon koblet til dataopsamlingsudstyr kan vi analysere den lyd, som en lyd giver sender ud. I tilfældet med stemmegafflen lyder tonen meget "ren", hvilket skyldes, at lyden består af én frekvens.

En graf med lydstyrken ved mikrofonen som funktion af tiden giver et billede af lydets bølgeform. I tilfældet med stemmegafflen er bølgeformen en sinuskurve som vist øverst på figur 2.71. Hvis vi derimod spiller tonen "a" på forskellige musikinstrumenter, lyder det anderledes, og bølgeformen ser anderledes ud. Det skyldes, at de andre instrumenters lyd også indeholder flere høje frekvenser over 440 Hz. Disse højere frekvenser kaldes *overtoner* og farver klangen i lyden, mens selve tonen er bestemt af den laveste og oftest kraftigste frekvens, kaldet *grundtonen*.

Når en guitar og en tuba spiller den samme tone, indeholder den lyd, de frembringer, begge den samme grundtone, men deres klang er forskellig, da instrumenterne forstærker forskellige overtoner. Overtonerne svinger med et antal gange grundtonens frekvens. Almindeligvis bliver styrken af overtonerne svagere, efterhånden som vi kommer længere op i overtonerækken. Men de er dog kraftige nok til, at vi kan registrere op til 20 overtoner fra nogle musikinstrumenter. Hvis eksempelvis en obo spiller kammertonen "a" med grundtonen 440 Hz, vil der samtidig klinge overtoner med frekvenser omkring 9000 Hz!

Bølgeform



Frekvensspektrum (fourier-spektrum)

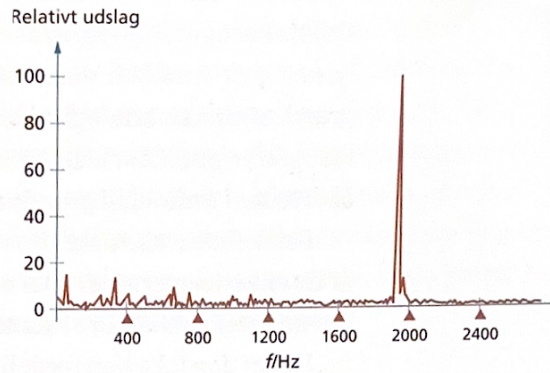


Fig. 2.72 Samme lyd vist til venstre som bølgeform og til højre som frekvensspektrum. For bølgeformen angiver x-aksen tiden, mens y-aksen viser udslaget, også kaldet amplituden, af lydbølgen. På et frekvensspektrum angiver x-aksen frekvensen, mens y-aksen angiver styrken af de enkelte frekvenser i forhold til hinanden.

Frekvensspektret

En lyds bølgeform viser, hvordan trykket i luften ved mikrofonen rent faktisk ændrer sig som følge af netop den lyd. Det er dog ikke nogen særlig hensigtsmæssig måde at undersøge lyd på. En lyd bliver hurtigt så kompliceret, at det bliver vanskeligt at analysere den ved at iagttage udsvinget som funktion af tiden. I stedet kan vi udnytte, at enhver lyds bølgeform kan opfattes som en sum af en række forskellige toner med forskellig frekvens. Ved en teknik kaldet *fourier-analyse* er det muligt at undersøge hvilke frekvenser, der indgår i en lyd, og med hvilken styrke de indgår. På den måde kan vi beskrive en hvilken som helst lyd som summen af en række forskellige frekvenser. Vi kan tænke på det, lidt ligesom Solens lys indeholder forskellige frekvenser, der kan betragtes i en regnbue eller i et prisme.

Lav jeres egne lyde med overtoner

Find på nettet et program, hvor I kan "lave" lyde. I kan eksperimentere med at sammensætte en lyd med en grundtone og overtoner, som I selv vælger. I kan også høre den lyd, I skaber og samtidig se bølgeformen. Brug for eksempel søgeord som *Fourier*, *Series* og *Applet*.

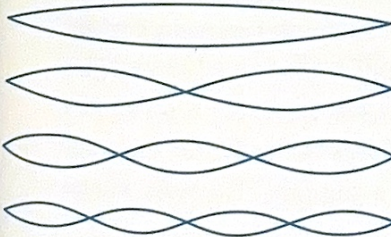


Fig. 2.73 Forskellige stående bølger på en streng svarende til grundtonen og tre overtoner.

Mål overtoner på en guitarstreng

Figur 2.73 viser de forskellige stående bølger på en streng svarende til grundtonen og tre overtoner. Ved hjælp af en mikrofon og et dataopsamlingsprogram skal I nu undersøge følgende hypotese: *For hver overtone, man "går op", forøges frekvensen med netop grundtonens frekvens.*

Optag gennem computerens mikrofon tonen "a", idet I slår næstøverste streng på en guitar an. Vis frekvensspekret på skærmen og undersøg, om hypotesen er sand. Grundtonen er den top i frekvensspekret, der har den laveste frekvens.

Selv om guitaren ikke stemmer, kan I stadig undersøge, om hypotesen er sand. Hvordan?

Prøv dernæst at slå guitarstrengen an forskellige steder på strengen, eksempelvis midt på strengen og tæt på stolen, dér hvor strengen er gjort fast til klangkassen. Sammenlign frekvensspekret for jeres målinger af den samme streng slået an på forskellig måde. Find eventuelt andre måder at slå strengen an på.

Prøv at opstille en sammenhæng mellem jeres opfattelse af lydets klang, når I lytter, og fordelingen af overtoner.



Fig. 2.74 Guitarens form er ikke tilfældig.



Hvilke tre variable har betydning for, hvilken tone en guitarstreng udsender?

Fourier-analyse er et matematisk værktøj, som gør os i stand til at se lydens bestanddele i form af et *frekvensspektrum*. Ligesom man taler om lysets spektrum kan man også tale om en lydets frekvensspektrum. På grund af denne analogi, taler vi om en tones "klangfarve". En tones klangfarve eller blot klang beskriver således en tones fulde spektrum af overtoner i forhold til grundtonen.

Forskellen i instrumenters klangfarve kan ses ved forskellen i styrken af de enkelte overtoner. Det er med andre ord fordelingen af overtoner, der gør menneskets øre i stand til at høre forskel på en harpe og en tuba.

Det er dog ikke kun fordelingen af overtoner, der giver en stemme eller et musikinstrument sit særpræg. Den måde, hvorpå der spilles på instrumentet, betyder også meget for, hvordan en tone opfattes. Slår man på et bækkens eller en tromme, er lyden mere "pludselig" i forhold til en tone frembragt ved at puste i en flaske - her kan man høre lyden af luft, inden selve tonen sætter ind. Man taler om en lydets "attack" som den tid, der går fra lyden starter, til den når sin maksimale lydstyrke. Folk, der arbejder professionelt med lyd kvalitet, har herudover en række begreber, de benytter til at beskrive forskelle i lyde. Det vigtigste værktøj er dog stadig fordelingen af frekvenser, som det kan ses i et frekvensspektrum.

Om stødtoner og stemning af en guitar

Lymbølger kan interferere. Det kan vi udnytte, når vi skal stemme to instrumenter i forhold til hinanden, eller når vi skal stemme en guitars strenge, så de klinger rent indbyrdes. Her udnytter vi et fænomen, der betegnes stødtoner eller svævning.

Hvis to instrumenter kun næsten stemmer, vil der være en lille forskel i frekvenserne, når de forsøger at spille den samme tone. På grund af konstruktiv og destruktiv interferens mellem de forskellige bølger vil lyden, de frembringer i fællesskab, variere i styrke. Spiller det ene musikinstrument en tone på 440 Hz, mens det andet spiller 439 Hz, vil deres fælles lyd variere i styrke med frekvensen: $440 \text{ Hz} - 439 \text{ Hz} = 1 \text{ Hz}$. Altså vil man kunne høre en variation i lydstyrken på deres fælles lyd én gang per sekund. Generelt vil frekvensen af denne svingning i lydstyrke kunne udregnes ved $f_{\text{lydstyrke}} = f_1 - f_2$.

Resonans

Den akustiske guitar behøver et resonanskammer, da lyden her underbygges og forstærkes. *Resonans* optræder, når frekvensen af den frembragte lyd kan skabe stående svingninger eksempelvis inde i en guitar-kasse. Men det forekommer også alle andre steder, hvor der frembring-

es lyd. Når I synger på badeværelset, har I måske lagt mærke til, at nogle toner, tit dybe, forstærkes kraftigere end andre. Har I et klaver eller en guitar, kan I prøve at råbe, hvorefter I måske svagt kan høre, at strengene svinger, helt uden at nogen har rørt ved dem. De er altså blevet sat i svingninger af lyden fra jeres råb. Når man bygger musikinstrumenter, forsøger man at undgå, at de har kraftig resonans ved bestemte toner, da disse vil blive forstærket unaturligt og skæmme den musikalske oplevelse. Dette er faktisk en af årsagerne til, at en guitar har den bestemte form og ikke blot er en firkantet kasse.

Undersøg resonansen i rør

I skal undersøge en række åbne rør af forskellig længde. Blæs ned i rørene eller slå rørene mod håndfladen.

Nogle af de variable, I kan have mellem jeres rør, kan være tykkelsen af rørene, materialet, røret er lavet af, og længden af røret.

- Undersøg, hvilken af disse variable der har betydning for, hvilken tone røret frembringer.
- Kan I bestemme, hvilken sammenhæng der gælder? (Jo..., desto dybere tone.)
- Undersøg om den samme sammenhæng gælder for halvåbne rør. Halvåbne rør kan eksempelvis laves ved at bruge reagensglas med forskellige mængder vand i.

Undersøg klangfarven af musikinstrumenter

I skal bruge to eller flere forskellige musikinstrumenter til denne aktivitet.

- Start med at spille samme tone på hvert af de valgte musikinstrumenter. Forsøg med ord at beskrive forskellen mellem lyden af musikinstrumenterne.
- Optag ved hjælp af et dataopsamlingsprogram et frekvensspektrum af to eller flere musikinstrumenter. Se på frekvensspektret og bestem grundtonen og overtonerne som toppe

i spektret. Divider nu frekvenserne af toppene ved højere frekvens, eksempelvis 1351 Hz, med grundtonens frekvens og tjek, at resultatet er tæt på at være et helt tal. Eksempel: $\frac{1351 \text{ Hz}}{440 \text{ Hz}} = 3,07 \approx 3$. Navngiv overtonerne.

- Aflæs nu styrken af grundtonen på y-aksen. Aflæs tilsvarende styrken af jeres overtoner i frekvensspektret.
- Konstruér et regneark med resultaterne af ovenstående to punkter, så I kan tegne en graf med overtonens nummer ud ad x-aksen og tilhørende værdier af overtonernes styrke op ad y-aksen. Graferne for de forskellige instrumenter må gerne tegnes i samme koordinatsystem.
- Diskutér ud fra jeres graf klangfarven for de anvendte musikinstrumenter.

Guitaren

En guitarstreng, der er 64,5 cm lang, er stemt således, at den udsender en grundtone med frekvensen 246,9 Hz, når den anslås.

- Hvad er bølgelængden på strengen af den svingning, der svarer til grundtonen?
- Hvad er udbredelsesfarten af svingningerne på strengen?

Antag, at udbredelsesfarten i luft er $343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

- Bestem frekvens og bølgelængde af svingningerne i luften.

Der gælder følgende sammenhæng mellem farten v af bølgen på en streng, den kraft F , som strengen er spændt op med, og m_1 , der er massen af strengen pr. længde:

$$v = \sqrt{\frac{F}{m_1}}$$

En guitarspiller stemmer en e-streng, så den har frekvensen 329,6 Hz.

Strengens længde er 64,5 cm,

og massen pr. længde er $0,40 \frac{\text{g}}{\text{m}}$.

- Hvor stor er den kraft, som strengen er spændt med?

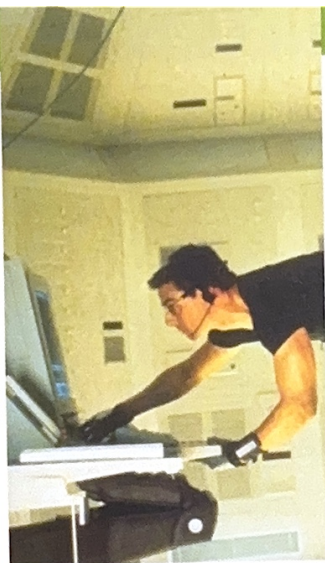
Man sammenligner lyden fra a-strengen på en ustemt guitar med lyden fra en stemmegaffel på 110 Hz. Når strengen og stemmegafflen begge slås an, hører man 10 stødtoner på 5 sekunder.

- Hvad er frekvensen af den tone, der udsendes fra den ustemte streng?



2.11

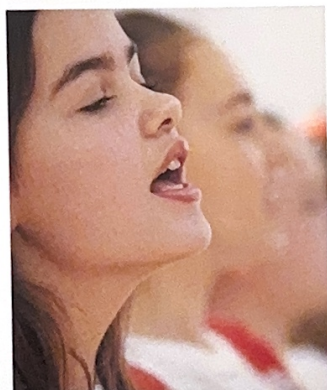
Genkendt på lyden!



I har set det på film. Specialagenten skal ind i et hemmeligt rum. For at komme ind må han afgive det rigtige fingeraftryk på en skanner eller måske få skannet sin øjeiris. Endelig må han sige et kodeord, og hans stemme genkendes af en computer. Først nu åbner den tunge dør sig, og han kan endelig træde ind i det hemmelige rum. Vi ved, at vores fingeraftryk er unikt for den enkelte person. Men er det faktisk muligt at benytte stemmen som en identifikation, som man ser det på film?

Her lærer du mere om

- Bølger 213
- Bølgers udbredelse 214
- Interferens 218
- Overtoner 228

**Vokalfarvning**

Når vi taler, frembringes lydbølger ved at sætte stemmelæberne i svingninger. Den lyd, stemmelæberne frembringer, formes ved at ændre på klangrummet i munden. Dette sker, når vi bevæger tunge, læber og ganesegl. Eksempelvis er der meget stor forskel på, om vi synger med lukket eller åben mund.

Selv om vi synger den samme tone, lyder det meget forskelligt. Lyden vil have en forskellig klangfarve. Hvis vi synger på vokalen "a", som i ordet *abe*, vil det have en klangfarve med mange flere overtoner i forhold til den samme tone sunget med lukket mund "Mmm". Stemmelæberne vil i begge tilfælde fremkalde de samme lydbølger, men vi former lyden forskelligt i de to tilfælde og forstærker derved forskellige frekvenser.

Klangfarven skyldes overtonerne, også kaldet overharmoniske svingninger. Når vi kan høre forskel på vokalerne "a" og "i", skyldes det, at overtonerne forstærkes forskelligt, når vi bevæger munden. På figur 2.78 og 2.79 øverst på næste side kan man se lydspektret for henholdsvis vokalen "a" og lyden "Mmm".

Stemmegenkendelse – spektrogrammet

Det er altså muligt at måle forskel på vokaler, men det er ikke nok til at lave en sikker stemmegenkendelse. Alligevel er din stemme unik, fordi du har en unik måde at ændre stemmelæbernes klangbund gennem bevægelserne af mund, tunge og ganesegl. Du er altså unik i kraft af din egen krop. Et sikkerhedssystem baseret på stemmen skal derfor tage udgangspunkt i nogle bestemte fraser, som skal siges korrekt.

Fig. 2.78 Lydspektrum for vokalen "a". De mange toppe viser, at vokalen "a" frembringer mange overtone ud over grundtonen, som er toppen ved cirka 100 Hz. Bemærk, at overtonerne ligger med samme frekvensinterval imellem sig. Overtoners frekvens er et helt antal gange grundfrekvensen.

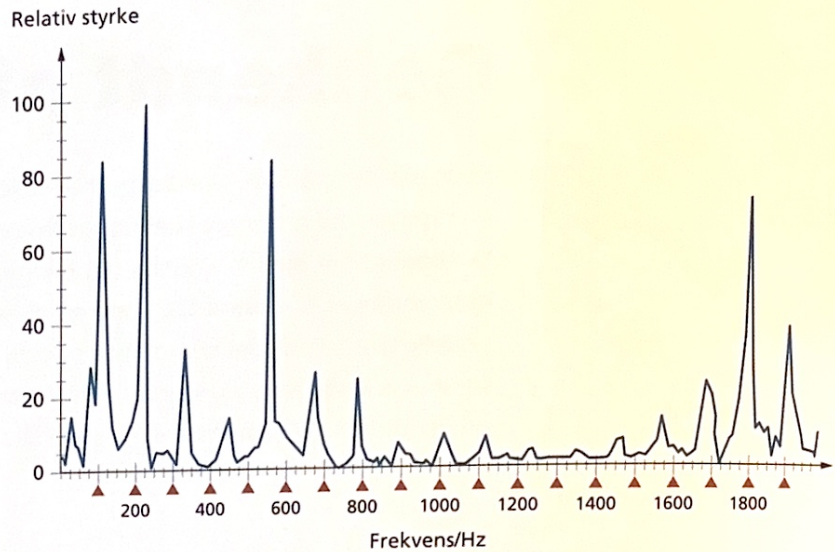
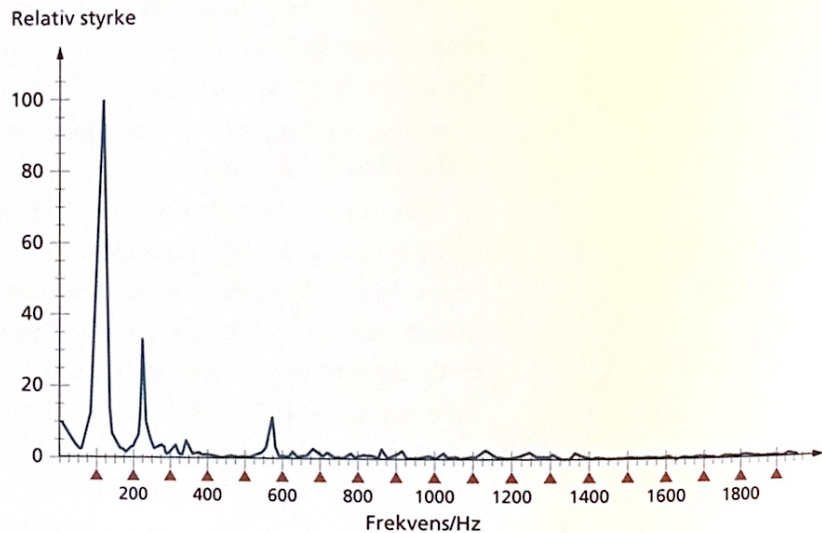


Fig. 2.79 Lydspektrum for lyden "Mmm", dannet med lukket mund. De relativt få toppe viser, at lyden "Mmm" frembringer meget få overtone ud over grundtonen, som er toppen ved cirka 100 Hz. Bemærk, at grundtonen er den samme som for vokalen "a" på figur 2.78. Det er altså den samme "tone" – men klangfarven er forskellig pga. antallet af overtone. Derfor kan vi høre forskel.



Undersøg fremmede vokalfarver

Ved hjælp af en mikrofon og et program, der kan lave fourierspektre, er det muligt at optage og analysere frekvensspektre for forskellige vokaler. Ud over de vokaler, som vi benytter hyppigst på dansk, findes der også en række vokaler på eksempelvis fransk eller andre fremmedsproge, som lyder helt anderledes.

- I skal optage og sammenligne forskellige vokaler med hensyn til antal og styrke af overtone.
- Hvilke vokale lyde kan man lettest høre forskel på? Bemærk, at det er hensigtsmæssigt at sørge for, at vokalerne har samme grundtone – altså det samme stemmeleje.
- Diskutér ud fra jeres frekvensspektre, om der findes en sammenhæng mellem, hvordan en vokal "lyder" og antallet af overtone.
- Optag og sammenlign frekvensspektret for den samme vokal fra forskellige personer. Kan man se forskel?

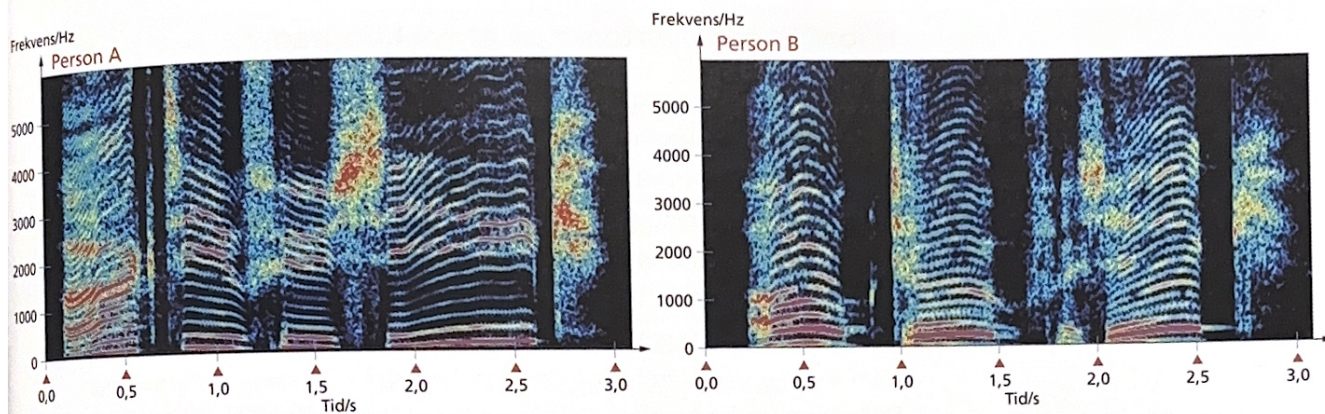


Fig. 2.80 Spektrogrammer fra to forskellige personer, som siger: "Aktiv fysik". Spektrogrammet viser det tidsmæssige forløb af lyden ud ad x -aksen, mens frekvenserne vises op ad y -aksen. Farven angiver styrken, hvor rød er kraftigst. Bemærk den store forskel imellem de to spektrogrammer, selv om personerne siger det samme.

Princippet i stemmegenkendelse kan illustreres ved hjælp af et *spektrogram*, som er vist på figur 2.80. Et spektrogram viser lyden, som den ændres med tiden. En konstant lyd har et konstant lydspektrum – altså en konstant fordeling af frekvenser som i tilfældet med vokalerne i figur 2.78 og 2.79. Vores tale består imidlertid af en række lyde, der hurtigt følger efter hinanden. Derfor er det relevant at se på frekvensfordelingen for hvert enkelt lydelement i talen, samt hvordan disse efterfølges af hinanden. Det svarer til at undersøge lydspektrets udvikling med tiden. Derfor har spektrogrammet tiden ud ad x -aksen, mens frekvensen vises op ad y -aksen. Farven i et spektrogram angiver styrken af lyden, hvor rød er kraftigst. På et sort/hvidt spektrogram er mørk det kraftigste. Farven i et givent punkt angiver altså styrken af en given frekvens på et givent tidspunkt.

Figur 2.80 viser spektrogrammet for to forskellige menneskers måde at sige *Aktiv fysik*. Som det ses, er der stor forskel i spektrogrammerne. Det er disse spektrogrammer, der kan benyttes som et slags fingeraftryk. På engelsk kalder man også spektrogrammet for et "voiceprint".

I en situation, hvor en agent skal skaffe sig adgang til det hemmelige rum, skal han altså ikke blot kende til det hemmelige kodeord "Aktiv Fysik". Han skal også kunne sige det på en måde, så hans spektrogram ligner det ægte spektrogram. Hvis spektrogrammet til venstre er det originale, og det til højre er agentens, vil han ikke kunne komme ind, da de ikke stemmer overens. Han kan naturligvis forsøge at lægge sin stemme om, men da vores stemme er fysiologisk betinget, vil det ikke være muligt at efterligne det oprindelige spektrogram – medmindre han på forhånd har anskaffet sig en optagelse af den originale stemme.

Hvordan ses overtoner på et spektrogram?

Et spektrogram kan bruges til andet end stemmegenkendelse. Vi kan benytte det til at analysere alle lyde, som udvikler sig med tiden. Figur 2.81 viser spektrogrammet for en guitarstreng, som klinger. Vi ser af spektrogrammet, at der er en systematisk afstand imellem de vandrette streger, der repræsenterer de enkelte frekvenser. Det skyldes, at lyden indeholder en række overtoner ud over den dybeste tone, som er grundtonen.

Af dette spektrogram kan vi tydeligt se, at en guitarstreng klinger med mange overtoner kort tid efter anslaget. Det ses, at de højeste frekvenser uddør hurtigst, hvorimod grundtonen klinger længe efter.

Fig. 2.81 Spektrogram af en guitarstreng, som klinger.

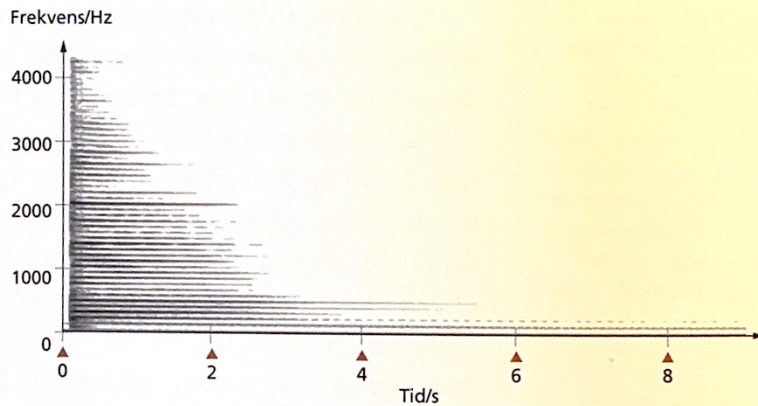
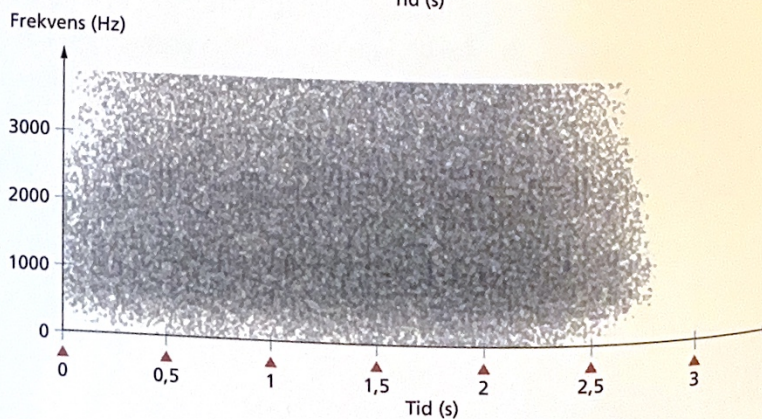
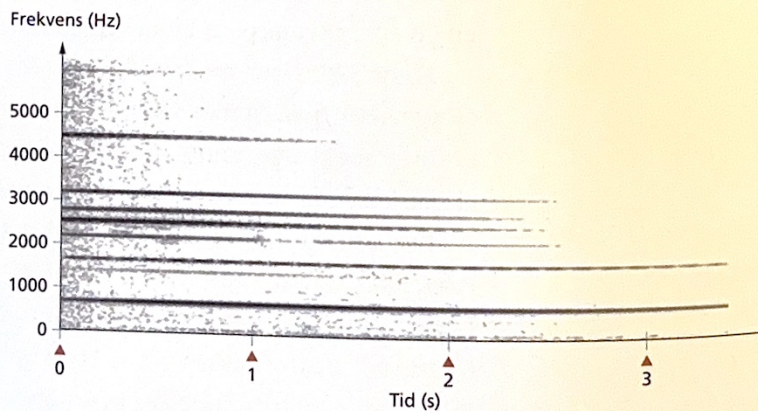


Fig. 2.82 To spektrogrammer – to meget forskellige lydbilleder. Se aktiviteten "Klokke eller klap?" på næste side.



Dopplereffekt

Når en bølge giver og en iagttager bevæger sig i forhold til hinanden, vil bølgens frekvens og bølgelængde observeres anderledes af iagttageren, end når de to er i ro i forhold til hinanden. Dette er specielt mærkbart, hvis den udsendte bølge er en lydbølge.

Hvis lyd giveren bevæger sig hen mod iagttageren, observeres bølgelængden som kortere end den bølgelængde, lyd giveren faktisk udsender. Iagttageren registrerer derfor en frekvens - eller "tone" - der er højere end lyd giverens faktiske frekvens. Sammenhængen mellem frekvensen i ro og frekvensen i bevægelse er givet ved:

$$f_{\text{obs}} = \left(\frac{v_{\text{lyd}}}{v_{\text{lyd}} - v_{\text{kilde}}} \right) f_{\text{ro}} \quad \text{hvor}$$

f_{obs} er den frekvens, iagttageren observerer
 f_{ro} er den frekvens, lyd giveren faktisk udsender
 v_{lyd} er lydens fart
 v_{kilde} er lyd giverens fart

Når lyd giveren bevæger sig væk fra iagttageren, observeres bølgelængden derimod længere for iagttageren, som derfor registrerer en lavere frekvens. De samme sammenhænge som ovenfor kan benyttes, blot skal der være et plus foran v_{kilde} , da lyd giveren nu bevæger sig væk.

Fig. 4.41 Dopplereffekt. Samme effekt fås, hvis det er os, der er i bevægelse, mens lyd giveren står stille. Vi oplever det eksempelvis, når vi med toget krydser en togoverskæring.



Eksempel

En ambulance kommer lige imod jer med fuld udrykning. Den kører med farten $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, det vil sige $25,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Udrykningssirenen udsender en lyd med frekvensen 1000 Hz. Lydens fart er $343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, og derfor vil I registrere en frekvens på:

$$f_{\text{obs}} = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{343 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot 1000 \text{ Hz} = 1080 \text{ Hz}$$

Når ambulancen overhalet jer og er på vej væk, ændres frekvensen til:

$$f_{\text{obs}} = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{343 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \cdot 1000 \text{ Hz} = 932 \text{ Hz}$$

Vi kan også angive dopplereffekten på bølgelængden i stedet for frekvensen. Der gælder da, at ændringen i bølgelængden $\Delta\lambda$ er givet ved:

$$\Delta\lambda = \frac{v_{\text{kilde}}}{v_{\text{lyd}}} \cdot \lambda_{\text{ro}}, \quad \text{hvor } \lambda_{\text{ro}} \text{ er bølgelængden af lyd giveren uden bevægelse.}$$

Dopplereffekten som fænomen eksisterer for alle typer af bølger, og derfor også for lys. I vores hverdag bevæger vi os dog med så lav fart, at dopplereffekten for lys ikke er mærkbar.

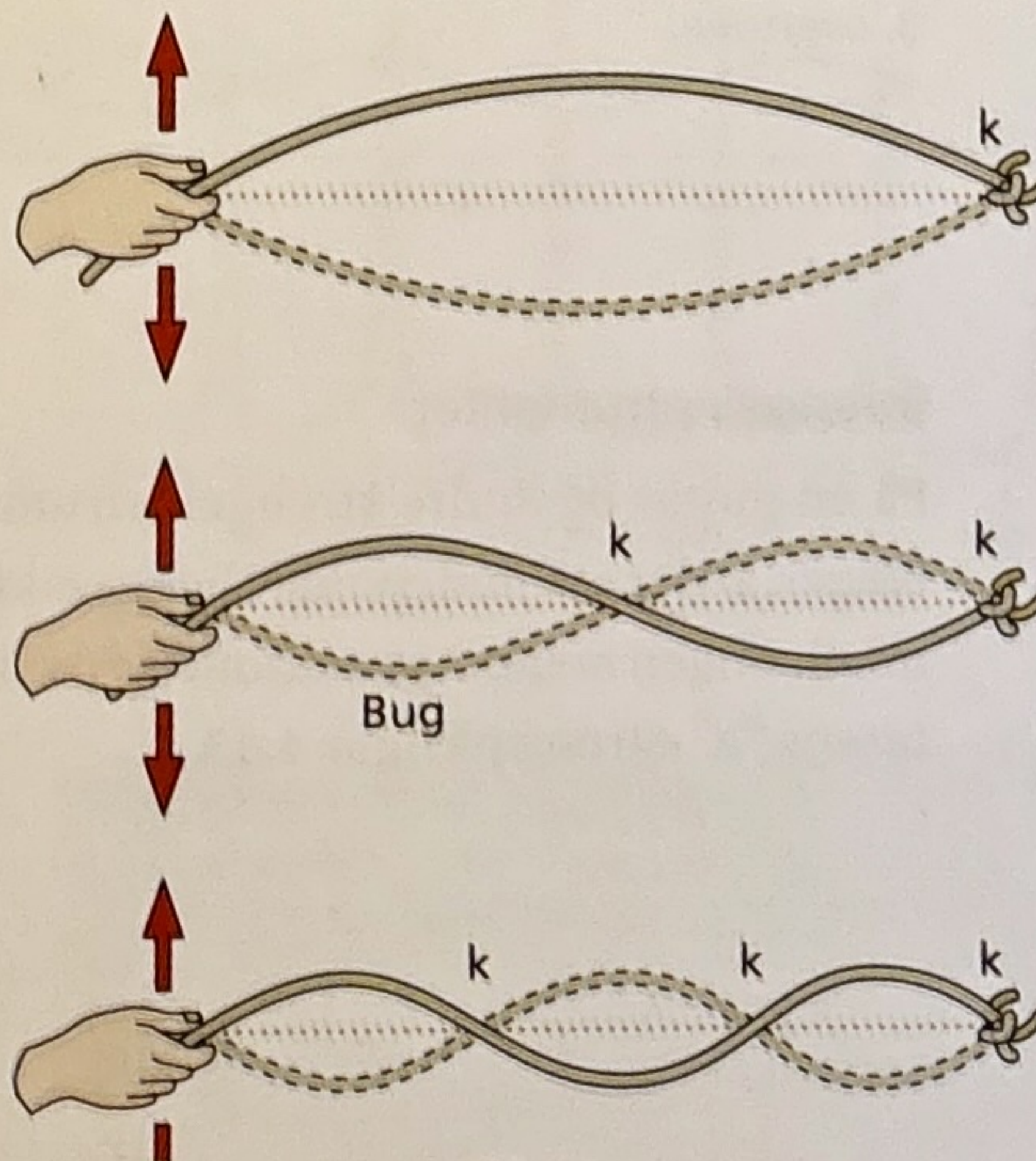
Stående bølger

I afsnittet om *interferens* (se s. 218) har I læst, at to bølger, som møder hinanden vil interferere. Hvis en enkelt bølge reflekteres fra en overflade, vil den faktisk også interferere med sig selv. Dette kan skabe stående bølger, som er et vigtigt fænomen inden for lyd og musik.

For at kunne danne stående bølger for eksempel på en streng skal der gælde, at den indkomne og den reflekterede bølge danner et stående interferensmønster. For bølger på en streng kan det kun lade sig gøre, hvis de frekvenser, strengen svinger med, "passer med", at bølgen har knudepunkt, altså intet udsving, i begge ender som vist på figur 4.42.

Imellem knudepunkterne har bølgen sit maksimale udsving - hvilket kaldes *bug*. Her vil strengen svinge op og ned med svingningens frekvens. Det ser således ud til, at bølgen svinger stående - heraf navnet *stående bølger*. Men i virkeligheden ser vi et interferensfænomen mellem den indkomne og den reflekterede bølge.

Fig. 4.42 Stående bølger på en snor. Knudepunktet angivet med k. Midt mellem to knudepunkter findes en bug.



Overtoner

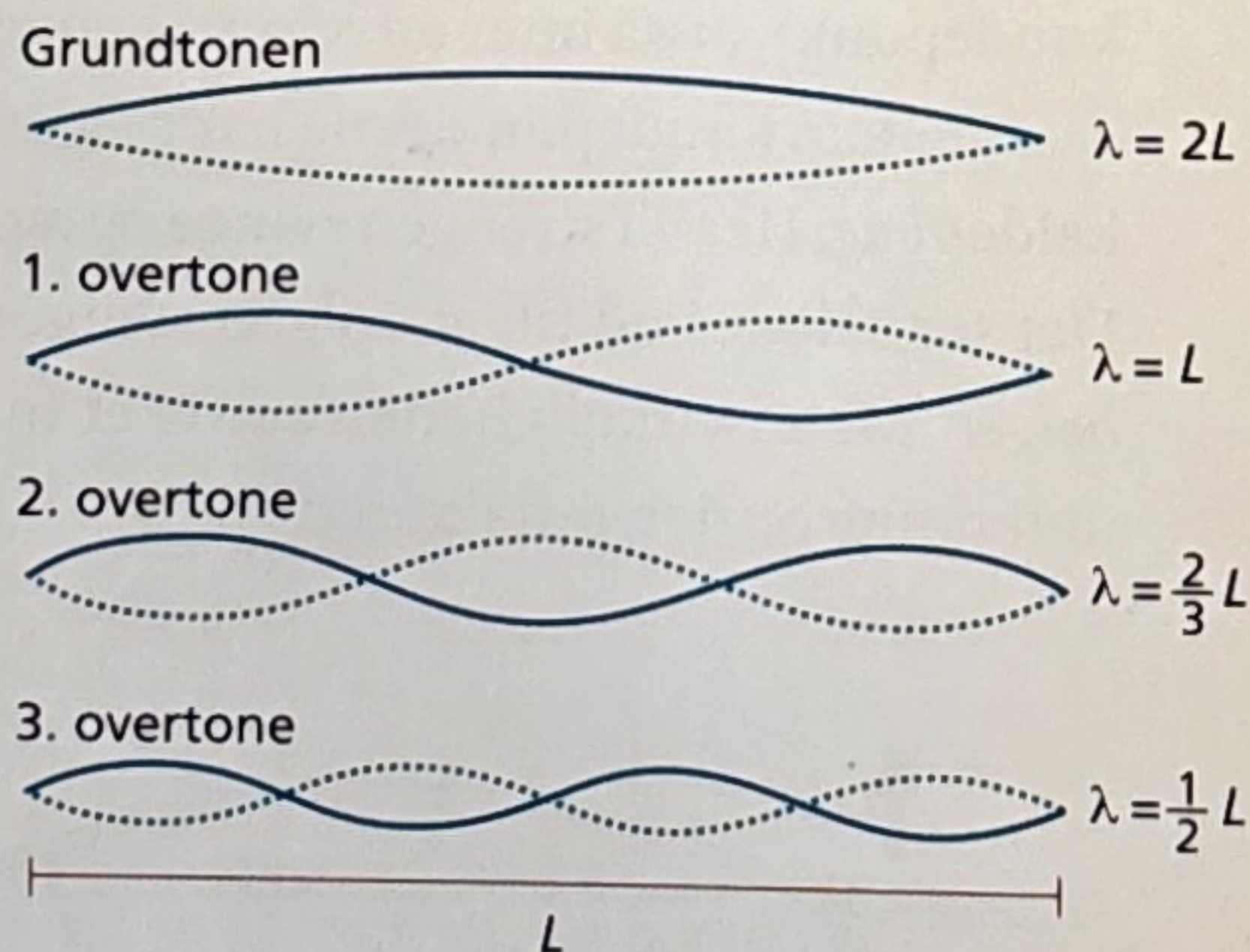
Når vi frembringer en tone på et musikinstrument, får vi i virkeligheden mange toner, nemlig både grundtonen og et antal overtoner. Overtonerne findes ved helt bestemte frekvenser i forhold til grundtonen, hvilket skyldes, at de frekvenser, som klinger på et musikinstrument, svarer til stående bølger.

Overtonerne giver tonen karakter. Præcis hvilken frekvens, overtonerne har i forhold til grundtonen, afhænger af musikinstrumentets opbygning. Nedenfor er vist, hvordan overtonernes frekvenser bestemmes for strengeinstrumenter og blæseinstrumenter.

Fig. 4.43 Sammenhængen mellem overtonenummeret n , frekvensen f og bølglængden λ for "a"-strengen på en guitar med længden $L = 65$ cm og grundtonen: $f = 110$ Hz.

Overtonenummer	Frekvens f	Bølglængde λ
0. (grundtonen)	$f = 110$ Hz	$\frac{2L}{1} = 130$ cm
1. overtone	$2f = 220$ Hz	$\frac{2L}{2} = 65,0$ cm
2. overtone	$3f = 330$ Hz	$\frac{2L}{3} = 43,4$ cm
3. overtone	$4f = 440$ Hz	$\frac{2L}{4} = 32,5$ cm
n . overtone	$(n + 1)f$	$\frac{2L}{n + 1}$

Fig. 4.44 Stående bølger på en streng svarende til figur 4.42.



Strengeinstrumenter

På en guitar og andre strengeinstrumenter er betingelsen for stående bølger, at der er knudepunkt i begge ender, hvor strengen er fæstnet. Sammenhængen mellem grundtone og overtoner er eksemplificeret med guitarens "a"-streng på figur 4.43.

Blæserinstrumenter

Stående bølger og dermed overtoner afhænger for blæserinstrumenter af, om luften kan bevæge sig ud gennem begge ender som på en tværfløjte eller kun i den ene ende som på en klarinet. Vi siger, at tværfløjten har et *åbent resonansrør*, mens klarinetten har et *halvåbent resonansrør*.

Der kan kun opstå stående bølger med en bølgelængde, som passer med, at bølgen har bug i instrumentets åbne ende(r) og knudepunkt i rørets lukkede ende. Derfor er de mulige overtoner forskellige for de to typer blæserinstrumenter, selv når de spiller den samme tone. Dette kan I studere nærmere på figurerne 4.45-4.47.

Fig. 4.45 Sammenligning af stående bølger i et åbent og et halvåbent resonansrør. For et halvåbent resonansrør er kun halvt så mange stående bølger mulige.

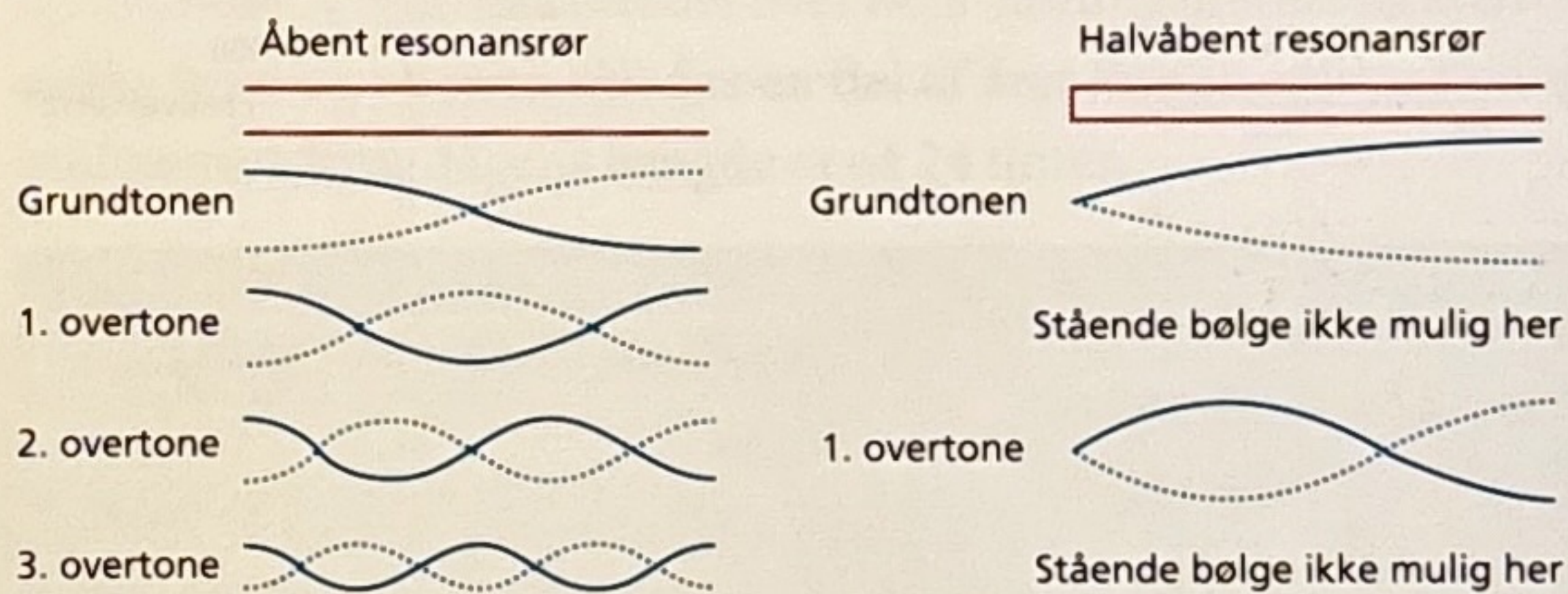


Fig. 4.46a Frekvensspektrum for en tværfløjte, som spiller tonen "c". Alle overtoner er mulige, da tværfløjten er et åbent resonansrør.

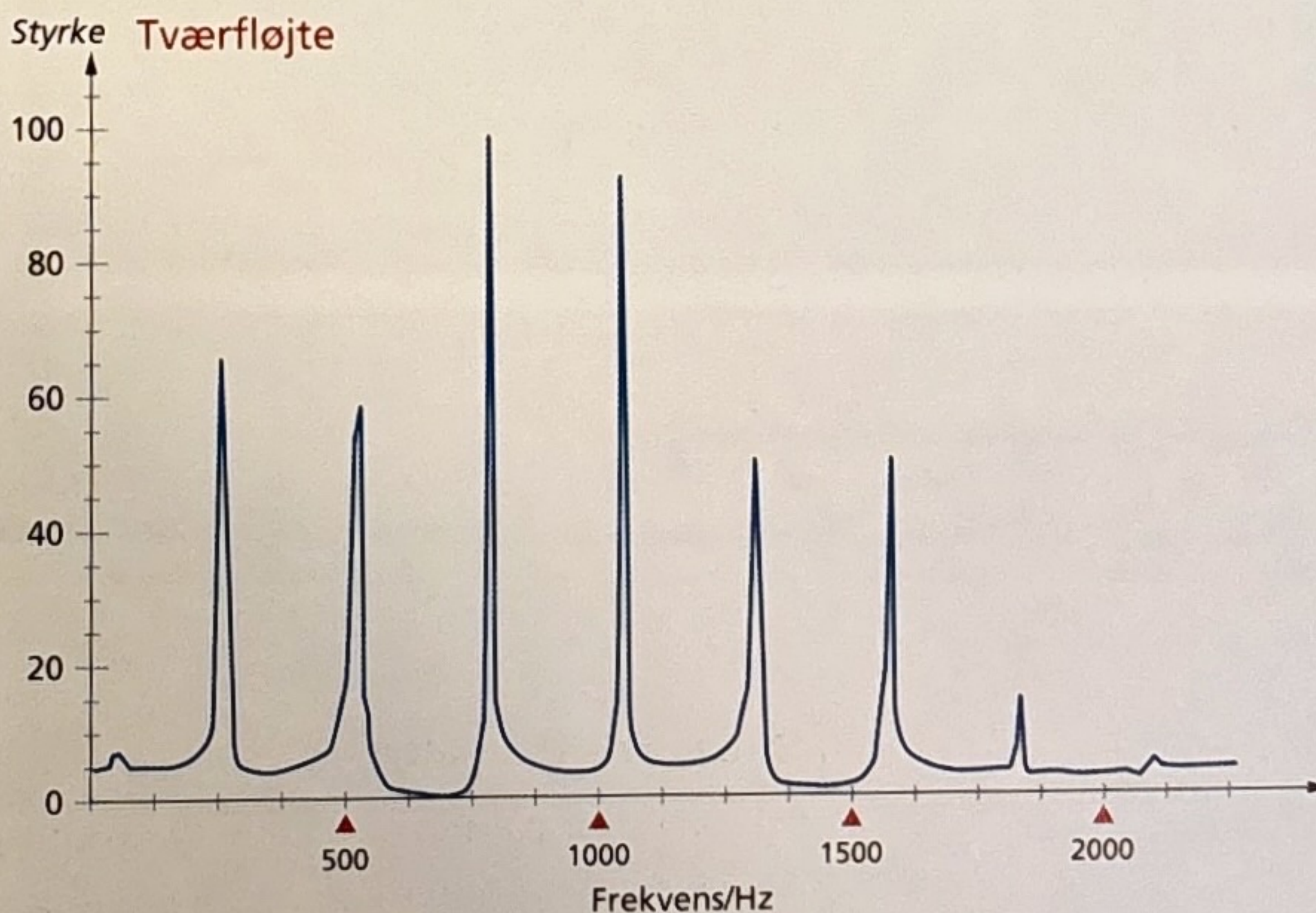


Fig. 4.46b Sammenhængen mellem overtonenummeret n og frekvensen f for tonen "c" på en tværfløjte med grundtonen $f_0 = 262$ Hz.

Overtonenummer	Frekvens, f
0. (grundtonen)	$f_0 = 262$ Hz
1	$2f_0 = 524$ Hz
2	$3f_0 = 786$ Hz
3	$4f_0 = 1048$ Hz
n	$(n + 1) \cdot f_0$

Fig. 4.47a Frekvensspektrum for en klarinet, som spiller tonen "c". Da klarinetten er et halvåbent resonansrør, mangler hver anden overtone i forhold til tværflojten.

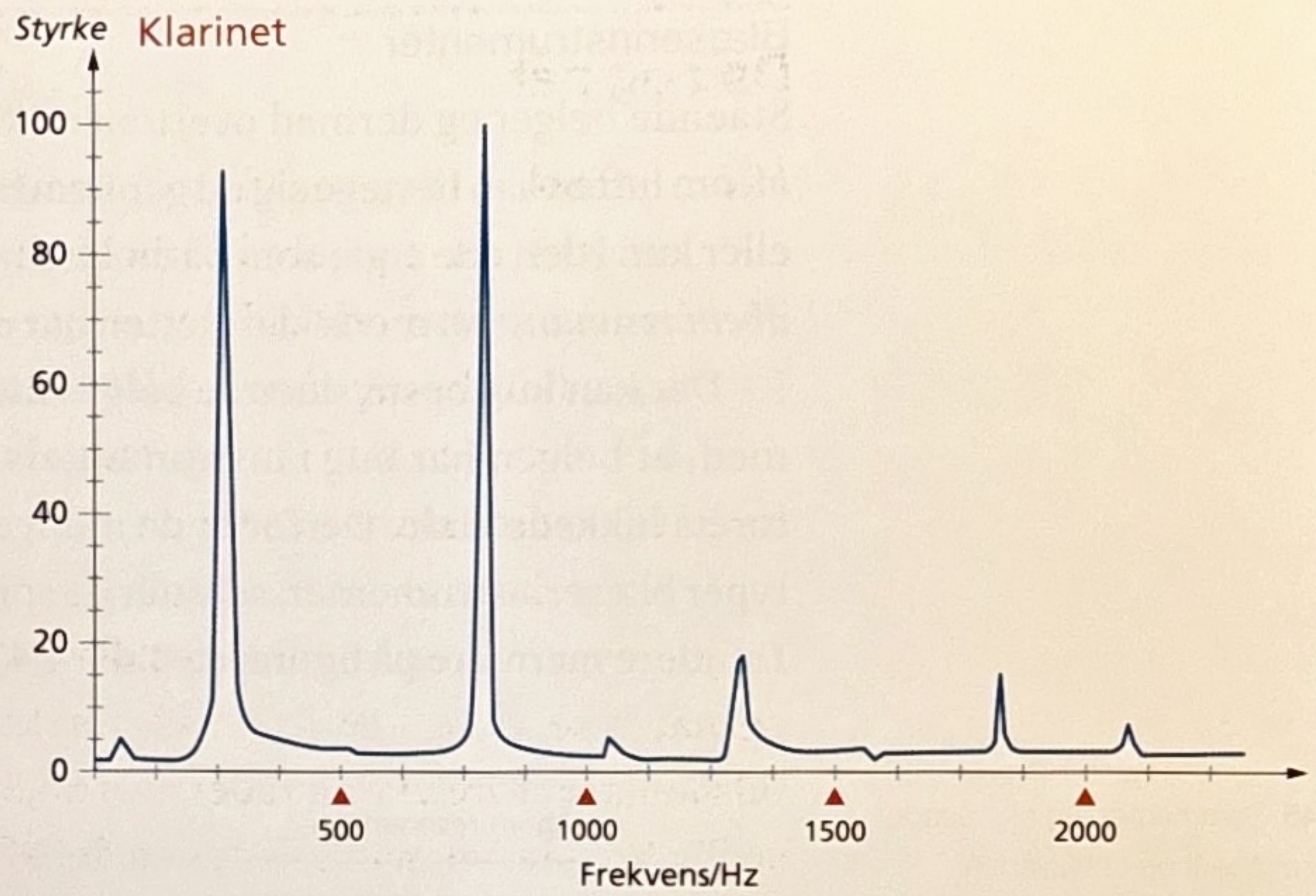


Fig. 4.47b Sammenhængen mellem overtone nummeret n og frekvensen f for tonen "c" på en klarinet med grundtonen $f_0 = 262$ Hz.

Overtone nummer	Frekvens, f
0. (grundtonen)	$f_0 = 262$ Hz
1	$3f_0 = 786$ Hz
2	$5f_0 = 1310$ Hz
3	$7f_0 = 1834$ Hz
n	$(2n - 1) \cdot f_0$

