

Musikteoretiske og akustiske aspekter ved konsonans og dissonans

Jørgen Mortensen

1. Indkredsning af problemstillinger

Indledning

»Jeg har ved hans Spil seet rolige Kjøbenhavnerne med dansk Efteraarstaage i Blodet blive politiske Bacchanter; *Mathematikere have svimlet i Klangfigurer og Beregninger om Lyden*«.

Således skriver H. C. Andersen i 1842 i opløftet begejstring over Franz Liszts spil, idet han ser den samme begejstring og næsten mystiske tiltrækning ved beskæftigelsen med musikens matematiske og fysiske aspekter.¹ Denne fascination synes at have eksisteret i årtusinder, i det mindste siden Pythagoras, hvem man tilskriver opdagelsen af intervallernes talforhold. Denne viden blev nærmest anset for at være en mystisk, guddommelig sandhed, og man så i den »livets sande realiteter«; den blev vogtet med den største nidkærhed, idet den var strengt esoterisk, og der var dødsstraf for at røbe den.² For Pythagoras som for utallige af hans efterfølgere har der ligget en nærmest arketypisk forestilling om, at man kunne trænge ind bag tingenes overflade og nå de ideelle, de egentlige tilstande, ved at undersøge de musikalske intervallers natur og fysiske beskaffenhed. Schopenhauer er måske den, der tydeligst har formuleret denne idé:

Dieser Theorie nun zufolge ist die Musik ein Mittel, rationale und irrationale Zahlenverhältnisse, nicht etwan, wie die Arithmetik, durch Hülfe des Begriffs fasslich zu machen, sondern dieselben zu einer ganz unmittelbaren und simultanen sinnlichen Erkenntnis zu bringen. Da nun ferner jenes Rationale und Irrationale in den Zahlenverhältnissen der Vibrationen unzählige Grade, Nüancen, Folgen und Abwechslungen zulässt; so wird, mittelst seiner, die Musik der Stoff, in welchem alle Bewegungen des menschlichen Herzens, d. i. des Willens, deren Wesentliches immer auf Befriedigung und Unzufriedenheit, wiewohl in unzähligen Graden, hinausläuft, sich in allen ihren feinsten Schattierungen und Modifikationen getreu abbilden und wiedergeben lassen,³

Den imponerende række af store filosoffer og videnskabsmænd, som »have svimlet i Klangfigurer og Beregninger om Lyden« vidner om, hvor dybt et greb i menneskesjælen denne forestilling har haft: Pythagoras, Platon, Aristoteles, Ptolemæus, Euclid, Boethius, Galilei, Kepler, Descartes, Leibniz, Leonhard

Euler, for blot at nævne nogle. Musikteoriens placering i quadrivium med aritmetik, geometri og astronomi i hele middelalderen vidner også om den store vægt, man lagde på musikkens matematiske aspekter. Det fremgår også af middelalderens og renæssancens musikteoretiske traktater: Der findes heriblandt ingen større traktat, som ikke gør grundigt rede for intervallernes talforhold.

Den indgående beskæftigelse med intervallerne har, allerede siden Pythagoras, som sit første formål haft at ordne dem i kategorier efter den numeriske beskaffenhed; disse kategoriers klanglige egenskaber skulle så stemme overens, være et produkt af den numeriske ensartethed. For pythagoræerne var der to kategorier: Konsonanser og dissonanser. Konsonanserne var de intervaller, hvis talforhold udmålt efter strengelængder kunne beskrives med forholdet $m:n$, hvor hverken m eller n overstiger 4. Der var altså tale om oktav (1:2), kvint (2:3), kvart (3:4), duodecim (1:3) og dobbeltoktav (1:4). De andre intervaller var dissonanser. Konsonanser var altså de intervaller, der havde de simpleste talforhold. I den videre erkendelse vil man naturligt nok lede efter den talmæssige logik i en mere differentieret opstilling, hvor alle intervallerne er ordnet efter »dissonansgrad«. Denne tanke har været drivkraften for utallige af Pythagoras' efterfølgere, både i tilfælde, hvor sigtet var en slags afdækning af »*Harmonices mundi*« (Kepler), og i tilfælde, hvor sigtet har været strengt naturvidenskabeligt, som i nogle af de nyeste undersøgelser i vor egen tid.

Kan man i dag finde en entydig sammenhæng mellem »dissonansgrad« og talforhold? Dette er en af de problemstillinger, der her skal tages op – andre spørgsmål, der hænger sammen med denne problematik, vil der blive redegjort for sidst i dette hovedafsnit, men forinden vil emnet blive indkredset, først musikteoretisk og -historisk og dernæst akustisk.

1.1. *Det musikteoretiske og -historiske konsonans / dissonans-begreb*

Som omtalt har intervallernes talforhold spillet en meget stor rolle i den tidlige musikteori, og ingen større traktat har undladt en redegørelse for dette. Der har gennem tiderne været mange forskellige opfattelser af, hvilke tillempninger der skulle ske i forhold til ren stemning ved dannelsen af en skala, og mange intervaller angives i forskellig »temperatur«, således f. eks. den store tert, der i den såkaldt pythagoræiske stemning har talforholdet 64:81, mens den i ren stemning har det enklere talforhold 4:5. Disse forskellige stemninger skal imidlertid ikke behandles nærmere, derimod skal forskellige klassificeringer af intervallerne gennemgås. Da det vil være uoverkommeligt at referere et større antal traktater, har jeg valgt at eksemplificere ud fra den italienske renæssance-teoretiker *Gioseffo Zarlino* (1517–90), idet jeg også anfører hans henvisninger til tidligere forfattere. Først vil jeg imidlertid perspektivere konsonans- og dissonansfænomenet musikhistorisk.

I 1300-tallet sker der et ret afgørende skred i den musikalske praksis ved den mere udbredte brug af tertser og sekster, og følgelig sker der også en fornyet musikteoretisk stillingtagen til disse intervaller; efter forskellige tilløb til nye

kategoriseringer af intervallerne, standardiseres opfattelsen hos musikteoretikerne i løbet af århundredet i den klassificering, der er almindeligt vedtaget den dag i dag: Oktav (1:2), kvint (2:3), prim (1:1) er fuldkomne konsonanser. Kvarten (3:4) er også en fuldkommen konsonans, dog er den dissonerende i forhold til bassen – denne ejendommelighed vil blive taget op i det følgende. Store og små tertser (4:5 og 5:6) samt store og små sekster (3:5 og 5:8) er ufuldkomne konsonanser. Sekunder, septimer, alle forstørrede og formindskede intervaller, herunder tritonus, er dissonanser. Alle intervallerne kan udvides med én eller flere oktaver uden at miste deres karakteristika.

Omkring år 1400 sker der en afgørende fornyelse i den måde, man konciperer flerstemmig musik på. Mens man i ars nova-tidens Frankrig havde komponeret efter det princip, der kaldes successivt kontrapunkt, hvorefter man f. eks. i en motet komponerer overstemmer, der hver for sig er kontrapunktisk afstemt med Tenor-stemmen, men uden rigoristiske samklangsregler for overstemmernes indbyrdes forhold, går man nu over til at opfatte alle stemmerne på én gang som en samlet harmonisk enhed, hvori hvert medlem er konsonant med alle andre. En afgørende indflydelse kom her fra England, hvor det euphoniske klangideal med mange tertser og sekster havde været dyrket i flere hundrede år. Det afgørende nye var imidlertid ikke denne praksis, men derimod den *contenance angloise*, hvorved man ifølge Bukofzer først og fremmest forstod dette, at en betonet dissonans af en vis varighed gerne skal være forberedt, og i alle tilfælde skal videreføres trinvis nedad.⁴ Den bundne dissonansbehandling var dermed knæsat, og den har holdt sig som et forbløffende konstant stiltræk i den vestlige verdens musik, helt til omkring år 1900. Omkring dette tidspunkt emanciperes dissonansen, og i vort århundrede musik med fri dissonansbehandling er det afgørende moment i en dissone-rende akkord ikke, at man venter en bestemt stemmeføringsmæssig videreførelse, men primært akkordens klanglige egenvalueur. Samtidigt hermed svækkes tonaliteten, til tider forsvinder den.

Der kan slet ikke være tvivl om, at den musikhistoriske udvikling omkring begyndelsen af dette århundrede er en revolution af mindst lige så stort omfang som udviklingen omkring år 13–1400. Det er derfor højst overraskende, at der ikke er sket en musikteoretisk nytænkning omkring konsonans og dissonans, som forsøger at forstå samklangsmekanismerne i vor tids musik ud fra deres egne præmisser og ikke ud fra et sandsynligvis forældet begrebsapparat. Arnold Schönberg gør sig visse overvejelser i sidste kapitel af sin »Harmonielehre« (»Ästhetische Bewertung sechs- und mehrtöniger Klänge«), bl. a. om en enkelt akkordtones toneleje (oktavfiksering) og om klangfarven:

Auch die Lage ist bindend; sowie ein Ton versetzt wird, wechselt die Bedeutung, hört die Logik und Brauchbarkeit auf, scheint der Zusammenhang zerrissen. Hier walten offenbar Gesetze. Welche, das weiss ich nicht. Die Bewertung der Klangfarbe, der zweiten Dimension des Tons, befindet sich also in einem noch viel unbebauten, ungeordneten Zustand als die ästhetische Wertung dieser letztgenannten Harmonien. Trotzdem wagt man unentwegt, die Klänge bloss nach dem Gefühl

aneinanderzureihen und gegenüberzustellen, und noch nie ist es jemandem eingefallen, hier von einer Theorie zu fordern, dass sie die Gesetze, nach denen man das tun darf, feststelle. Man vermag es eben vorläufig nicht.⁵

Schönberg efterlyser altså et nyt begrebsapparat for det samklangsmæssige, men dette synes imidlertid endnu ikke at have manifesteret sig. I hvilken retning en sådan nytænkning kunne gå, vil blive antydnet i nærværende artikel.

Tilbage til Zarlino. Dennes hovedværk *Le istitutioni harmoniche* er et af de vigtigste musikteoretiske skrifter i renæssancen.⁶ Ligesom de musikteoretiske forfattere før ham vidste han, at pythagoræerne ikke anerkendte tertser og sekster som konsonanser. Dette søgte han at korrigere og teoretisk at legitimere ved at udvide pythagoræernes tal 4 som grænseværdi for konsonanser til 6, hans *numero senario*: Alle intervaller, hvis talforhold kan beskrives med tallene fra 1 til 6, kaldes konsonante. Dermed bliver store og små tertser og store sekster inddraget blandt konsonanserne, mens den lille sekst's 5:8 må manipuleres på plads i klassen af konsonanser ved at blive opfattet som sammensat af en ren kvart og en lille terts!

Zarlinos klassificering af intervallerne stemmer overens med den gængse, men der er en interessant afvigelse i opfattelsen vedrørende kvartintervallet. I tredje del af *Le istitutioni harmoniche* ofres der et helt kapitel (kap. 5) på at slå fast, at kvarten under alle omstændigheder, også i forhold til bassen, er en konsonans. Først støtter Zarlino sig til en række ældre forfattere, helt tilbage til oldtiden. Dernæst følger et indirekte bevis: Et interval, der høres som perfekt konsonans i en harmonisk kombination, kan ikke også være dissonans. Aristoteles refereres for, at simple talforhold repræsenterer konsonante intervaller. Hvis man endnu ikke er overbevist, opfordres man til at lytte til en renstemt kvart. Zarlino prøver dernæst at forklare, hvorfor nogle har klassificeret kvarten som dissonans: Det skyldes en uoverensstemmelse mellem pythagoræerne og Ptolemæus. Pythagoræerne kunne ikke anerkende undecimen med talforholdet 3:8 som en konsonans. Ptolemæus' argumentation mod dette citeres: »Since the simple diatesseron is consonant, when it is added to the octave, the extreme strings of the union cannot be dissonant, because sounds added to the octave appear to be joined to one sound only«.⁷ Altså må man kunne udvide et interval med en oktav, uden at det ændrer ved intervallets karakter. Der henvises til Boethius, som imidlertid udelukker undecimen fra konsonanserne, hvilket Zarlino ikke anfører.⁸ De »latinske musikere« iagttag striden og var tvøvende med at anvende den med fuldstændig frihed, skriver Zarlino, hvorefter han fremhæver et eksempel på anvendelse af et kvartinterval til basstemmen i praksis i Josquin's *Missa l'homme armé sexti toni*. Zarlino konkluderer, at kvarten er konsonans, også i forhold til bassen, og at undecimen har nøjagtigt samme klangkarakter.

Denne mere end 2000-årige strid skal søges bilagt i afsnit 3.1.

1.2. *Det akustiske og hørepsykologiske konsonans / dissonans-begreb*

Med renæssancen begynder naturvidenskaberne og dermed også den akustiske viden at udvikle sig. Mange af de store videnskabsmænd, som f.eks. Galileo Galilei og Johannes Kepler brugte en del af deres tid på akustikken. På dette tidspunkt opdager man, at tonehøjden er afhængig af svingningernes frekvens, og Galilei fremsætter det synspunkt, at simple forhold mellem frekvenserne er afgørende for konsonans, fordi lyden så rammer trommehinden med større regelmæssighed. Andre videnskabsmænd som Leibniz og Leonhard Euler overtager denne forklaring, idet Leibniz dog taler om »sjælens ubevidste tællen«. ⁹ Euler inddeler samklange med to eller flere toner i forskellige klasser, afhængigt af tonernes frekvensforhold. ¹⁰ Frekvensforholdsteorien lever stadig i den nyeste forskning.

Da man i det 17. årh. opdager overtonerne og deres frekvensforhold 1:2:3:4 , gav dette anledning til nye teorier. For Rameau var alene det, at de simple talforhold 1:2 og 2:3 osv. fandtes i overtonespektret bevis for, at disse forhold måtte præsentere konsonanser. For senere forskere, som f.eks. den banebrydende musik-akustiker i forrige århundrede, von Helmholtz, var overtonernes relationer afgørende: Både i kraft af deres sammenfald ved konsonanser og i kraft af deres bidrag til konsonansen i de tilfælde, hvor overtoner fra hvert sit kompleks ligger med en lille frekvensforskel (af størrelsesordenen 30 Hertz). ¹¹ Der var specielt i tiden ca. 1860–1920 mange teorier fremme, herunder også omkring differens-tonens indvirken og omkring »fusion«. ¹² I denne tid blev der også gjort flere forsøg på at opstille en slags »intervallernes rangforordning«, bl.a. af v. Helmholtz og C. F. Malmberg. ¹³ Inden for de sidste 20 år har udforskningen af konsonans og dissonans taget et fornyet opsving, og der er god grund til at fremhæve Reinier Plomps forskningsindsats inden for den sensorisk orienterede akustik omkring simultane toner. Resultaterne foreligger i en lang række fremragende artikler samt i bogen *Aspects of Tone Sensation*, hvor man får en grundig orientering om og vurdering af den nyeste forskning. ¹⁴ Der er også grund til at fremhæve forskerne E. Terhardt ^{15 16 17} samt de to japanere Kameoka og Kuriyagawa for deres epokegørende arbejde, som der er gjort rede for i to artikler fra 1969 ¹⁸ Disse vil blive inddraget i diskussionen i nærværende artikel.

I denne nyeste såkaldt psykoakustiske forskning er *ruhed* et nøglebegreb. Det anvendes i mange tilfælde for at skelne mellem, hvad der er musikhistorisk konvention for at betragte som konsonans og dissonans, og hvad man uafhængigt af en musikalsk sammenhæng opfatter som dissonerende. I disse artikler i den akustiske faglitteratur sker der imidlertid alligevel meget ofte en drøning af terminologien over i retning af konsonans og dissonans, og spørgsmålet er, om dette altid kan forsvares musikteoretisk.

Ved siden af denne nyeste udforskning af horelsens sensoriske aspekter, er der også foregået en rivende udvikling i den horefysiologiske forskning, således at man i dag har langt større viden om, hvorfor horelsen fungerer som den gør herunder hvilke signaler der rent faktisk bliver transmitteret til centralnervesystemet. Nogle af denne forsknings opdagelser vil blive medtaget i diskussionen.

1.3. Problemstillinger

Følgende problemer vil blive søgt afklaret:

1. Hvilke årsager (fysiske og fysiologiske) er der til den akustisk definerede konsonans / dissonans, og kan denne forklare tilfredsstillende ud fra empiriske undersøgelser? Er der en intervallernes rangforordning (et »konsonans-indeks«) ud fra den numeriske basis?

2. I hvilket omfang ækvivalerer det musikteoretisk definerede konsonans / dissonans-begreb med det akustiske? Sagt med andre ord: I hvor høj grad hører vi konsonans og dissonans, som vi gør – i kraft af ørets bygning og i kraft af vores musikalske skoling? I det omfang, der viser sig ækvivalens, kan de årsager, der måtte være fundet under punkt 1. naturligvis siges også at være gældende for det musikhistoriske konsonans / dissonans-begreb.

3. I hvilket omfang hører konsonans / dissonans-begrebet sammen med den bundne dissonansbehandling, hvilke implicite høremåder ligger der heri, og hvorledes forstås de samklangsmæssige mekanismer i musik uden bunden dissonansbehandling?

2. Akustiske forudsætninger

2.1. Nogle elementære akustiske fænomener

Indledningsvis skal nogle grundlæggende akustiske forhold omtales.

Sinustonen, den rene tone, manifesterer sig fysisk ved en sinussvingning med en bestemt frekvens, f , der er den reciprokke værdi af periodetiden, T , og en bestemt lydtryksamplitude, A , der angiver den fysiske styrke (fig. 1.).

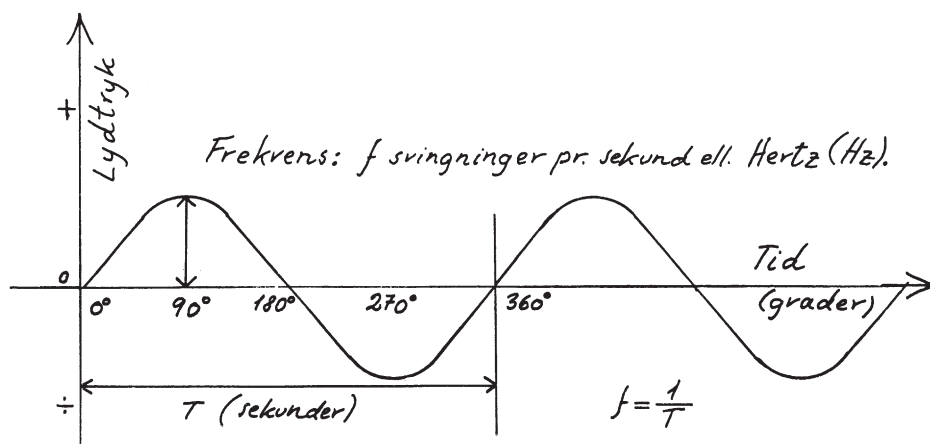


Fig. 1. Sinussvingning.

På det psykologiske plan svarer der (normalt!) en bestemt tonehøjde til en bestemt frekvens og en bestemt hørestyrke til en bestemt amplitude. Den fysiske styrke angives normalt ved lydtrykniveauet målt i decibel (dB) i

forhold til et bestemt referencelydtryk ($20\mu\text{N/m}^2$), mens hørestyrken måles i phon eller son. Hvis man fordobler amplituden, svarer det til, at lydtrykniveauet stiger med 6 dB. Hørestyrken vil også stige, men ikke på en sådan simpelt forudsigelig måde.

De fleste lyde, der forekommer i en musikalsk sammenhæng, er *komplekse toner* med *harmoniske spektre*, hvilket betyder, at de er sammensatte af en række sinustoner med talforholdet $1:2:3:4 \dots$ mellem frekvenserne. Man bruger betegnelserne grundtone, 1. overtone, 2. overtone osv. eller 1. deltone eller harmoniske 2. deltone, 3. deltone osv. I den akustiske terminologi betyder »grundtone« altså den første deltone i et harmonisk spektrum, mens »grundtone« i musikteoretiske sammenhænge kan forstås som grundtone i en akkord, f. eks. en mol-treklæng, eller som tonalt centrum i en større sammenhæng.

I det følgende henviser »kompleks tone« altid til et harmonisk spektrum, selv om der findes komplekse toner med inharmoniske komponenter, f. eks. visse klockelyde.

På det fysiske plan er det overtonernes antal og indbyrdes styrkeforhold, som er afgørende for, hvordan man på det psykologiske plan oplever klangfarven. Normalt opfattes ved en kompleks tone kun én tonehøjde, svarende til den, man opfatter ved 1. harmoniske isoleret.

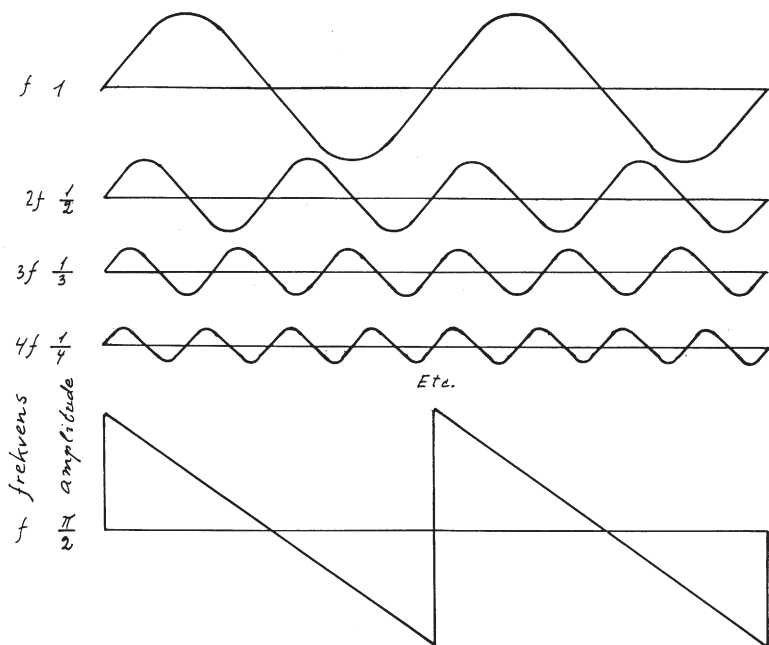


Fig. 2. Savtak-svingning med frekvens f og amplitude $\pi/2$, sammensat af 1., 2., 3., 4. etc. harmoniske med amplituderne henholdsvis 1, $1/2$, $1/3$, $1/4$ etc.

Fig. 2 tjener til illustration af en kompleks tone, der indeholder alle de harmoniske med følgende amplituder: $1, 1/2, 1/3, 1/4$ osv. De første fire af disse enkeltsvingninger er stillet op under hinanden, således at de alle er i fase ved 0° . De er derefter sammenlagt geometrisk, dvs. ved en simpel sammenlægning af alle værdierne på et givet tidspunkt. Den sammensatte svingning udgøres i dette tilfælde af en enkel geometrisk figur, nemlig en såkaldt savtak-svingning. Enhver periodisk svingning har en bølgeform, der matematisk kan opløses i et harmonisk spektrum, hvor enkeltkomponenterne er sinussvingninger med givne amplituder og faseforhold. Denne proces kaldes en Fourier-analyse.

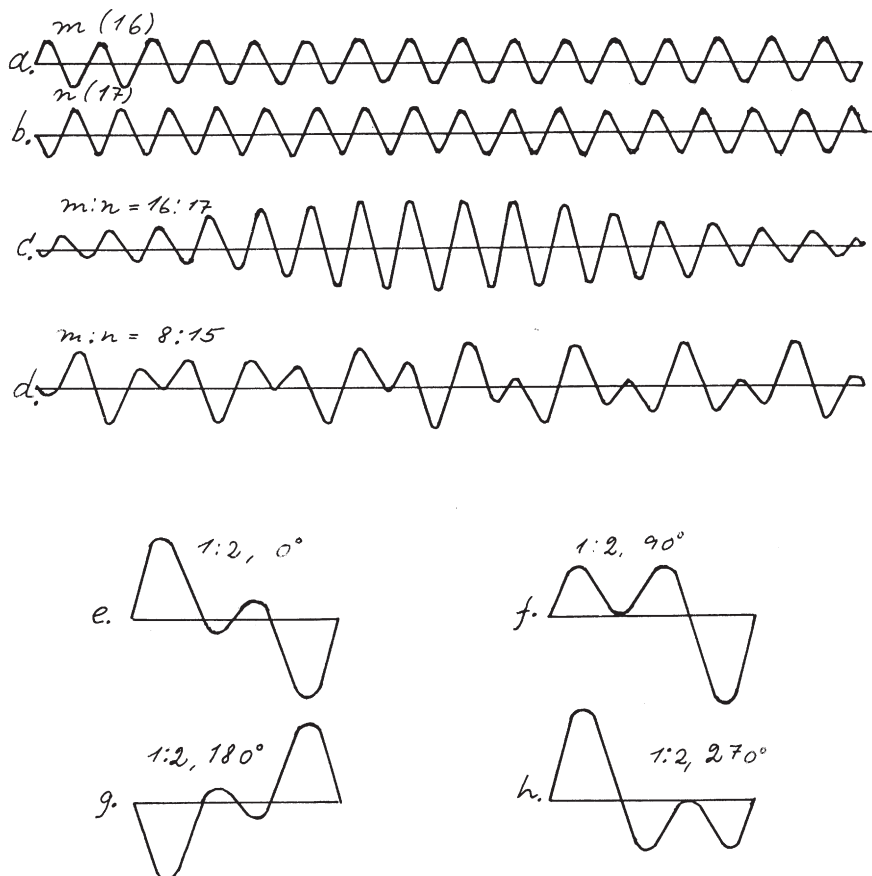


Fig. 3. a og b, sinussvingninger med frekvensforholdet $m:n = 16:17$; c, sammensat bølgeform af a og b; d, sammensat bølgeform af to sinustoner med $m:n = 8:15$; e, f, g, h, sammensatte bølgeformer af to sinustoner i oktavafstand ($m:n = 1:2$) i fire forskellige faseforhold (henholdsvis $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$).

Figur 3 viser nogle eksempler på svingninger, der er sammensatte af to enkelte sinussvingninger med samme amplitude. I det første eksempel er enkeltsvingningerne (a og b) med frekvensforholdet 16:17, svarende til en halvtone, vist. Den sammensatte svingning (c) har en indhylningskurve, som forøvrigt også er en sinus-kurve, med en periodetid, der er 16 gange den dybeste komponents periodetid. I eksempel d er forholdet mellem frekvenserne 8:15 svarende til en stor septim. Kurveforløbet fremstår ligesom med to overlappende indhylningskurver. I både eksempel c og d er enkeltkomponenterne i fase ved 0° . Indhylningskurverne vil være de samme, selv om der sker en faseforskydning og dermed ændringer i den »fine« struktur. Eksemplerne e, f, g og h viser, hvorledes den sammensatte svingning af to rene toner i oktavforhold kan tage sig forskelligt ud ved faseforskydning mellem komponenterne.

Figur 4 illustrerer, hvorledes man kan beregne energiindholdet i en given svingning, i dette tilfælde en trekantsvingning: Det foregår ved, at man kvadrerer kurven og beregner arealet under den kvadrerede kurve. Dette vil være et udtryk for energiindholdet.

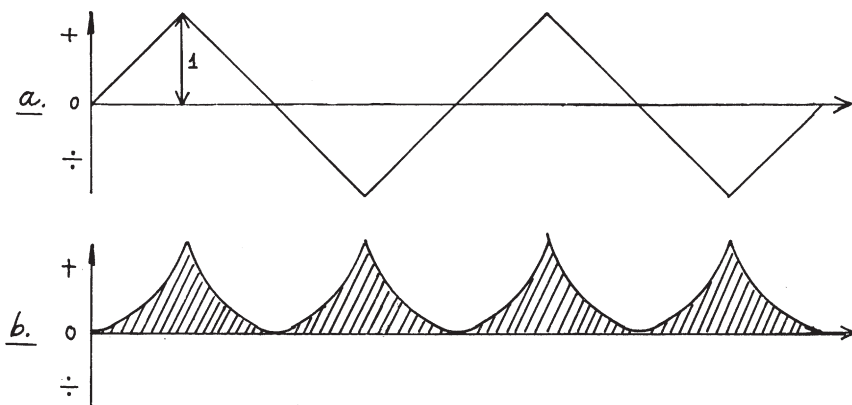


Fig. 4. Trekantsvingning (a), som er kvadreret i b. Det skraverede areal i b er et mål for energien i bølgen.

2.2. Hørelsens funktionsprocesser

Der skal i dette afsnit fremdrages nogle træk ved hørelsens funktion og herunder redegøres for nogle af den hørefysiologiske forsknings seneste resultater.

Ørets funktion er groft sagt at omforme lydenergi til nerveimpulser, det vil sige et akustisk signal til et fysiologisk signal, der kan analyseres og forstås af centralnervesystemet.

Når en lydbølge rammer trommehinden (se tværsnitsfigur af øret, fig. 5), omformes en vibration i luft til en mekanisk vibration, som fortsætter via

høreknoglerne, hammer, ambolt og stigbøjle, til det indre øre, sneglen (cochlea). Her forplanter den mekaniske svingning sig hydrodynamisk og mekanisk og sætter basilarmembranen i svingninger, som påvirker de sensoriske nerveceller, hårcellerne. Disse reagerer efter »all-or-none«-loven: Enten »fyres« der, dvs. der afgives en impuls (*spike*), eller også gør der ikke. Der er ca. 25.000 hårceller, som omformer signalet til en kode efter principper, der kan sammenlignes med den måde, en digital computer fungerer på. Dette elektriske signal forplanter sig til centralnervesystemet via de ca. 30.000 nervefibre i nervus acusticus med hastigheder på op til 100 m/sek.; det vil altså sige meget langsommere end elektrisk strøm i en ledning. I centralnervesystemet foregår den endelige analyse af signalet.

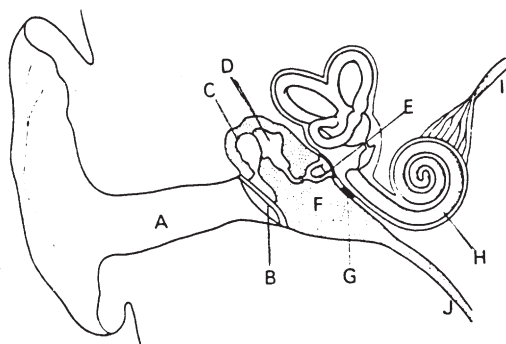


Fig. 5. Skematisk snit gennem det menneskelige øre: A, øregangen; B, trommehinden; C, hammer; D, ambolt; E, stigbøjle, der går ind mod det ovale vindue i cochlea; F, luftrum i mellemøret; G, det runde vindue; H, cochlea; I, nervus acusticus; J, det eustachiske rør. (Fig. fra *The New Grove Dictionary*, London 1980, art. »Hearing«).

Dette er blot hovedtrækkene i en overordentlig kompliceret og specialiseret proces, der ud over de nævnte funktioner også indbefatter forskellige tilbageløbsprocesser m.m. Der eksisterer ikke nogen fuldstændig teori omfattende alle detaljer i hørelsen, men der forskes intenst i aspekter ved hørelsens funktion, både ud fra *hvordan* hørelsen fungerer (fysiologisk) og ud fra *hvad* man kan høre (hørepsykologisk og sensorisk). Forskningen er i de senere år accelereret kraftigt med den moderne elektroniks frembringelser, såsom elektronmikroskoper og computere. Det er altså ejendommeligt nok netop ved hjælp af computere, at man har afsløret ørets computer-agtige funktionsmåde.

Cochleas indre er opdelt i tre kanaler, scala vestibuli, scala media og scala tympani (se tværsnitsfiguren øverst fig. 6). Midttertrekanten i dette tværsnit består øverst af Reissners membran og nederst af basilarmembranen. Det er rent funktionsmæssigt relevant at betragte cochleas indre opdeling, som om der kun var to væskefyldte hulrum, det øverste og det nederste, og samtidig se bort fra sneglens $2\frac{5}{8}$ vinding. Fig. 6 nederst skitserer denne simplificerede model, hvor sneglen er foldet ud. Idet stigbøjlen trykker ind mod det ovale

vindue, vil trykket i scala vestibuli stige, og da væsken (perilymfen) ikke kan komprimeres, udbøjes hele den cochleære deling ned mod scala tympani. Væskeforskydningen her vil forårsage en udbøjning af det runde vindue. Trækker stigbøjlen udad (svarende til undertryk i øregangen), vil den cochleære deling og dermed basilarmembranen forskydes opad mod scala vestibuli. Stigbøjleens bevægelser forplanter sig altså hydrodynamisk til basilarmembranen, dog uden at man kan sammenligne svingningerne på basilarmembranen direkte med svingningerne i væsken. Forplantningen fra stigbøjlen til basilarmembranen foregår imidlertid også mekanisk, idet svingningerne er koblet til basilarmembranen ved dens basis. Den lille åbning mellem kanalerne ved spidsen af sneglen, helicotrema, er kun i funktion for frekvenser, der er lavere end ca. 100 Hz.

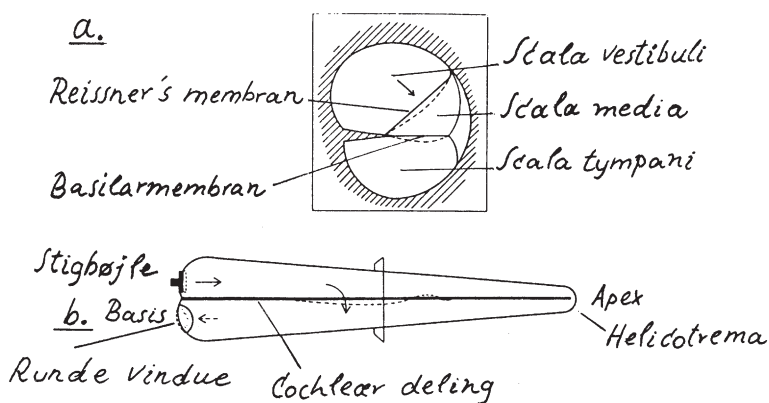


Fig. 6. Skematisk illustration af cochlea i tværsnit (a) og af den »udfoldede« cochlea (b). (Tilpasset fra G. v. Békésy: *Experiments in Hearing*, New York, 1960).

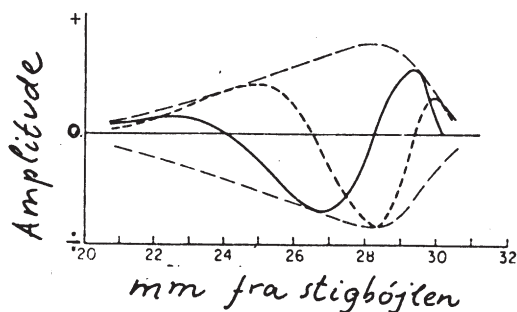


Fig. 7. En vandrende bølge langs basilarmembranen for en tone på 200 Hz. Den ubrudte linie viser deformations-mønstret på et givet tidspunkt. Den stiplede linie med korte streger viser den samme vandrende bølge en fjerdedel periode senere. Den stiplede linie med længere streger viser indhylningskurven for den maksimale forskydning i hvert punkt. (Tilpasset fra G. v. Békésy, *op. cit.*).

Basilarmembranens svingninger vil være højst forskellige ved forskellige lydsignaler. Hvis lydsignalet er en sinustone, vil der være en vandrende bølge på basilarmembranen, som har en indhylningskurve med største udbøjning et bestemt sted (fig. 7). Jo dybere tonen er, des længere oppe mod apex vil dette maksimum ligge, og jo højere tonen er, des nærmere vil det være ved basis (fig. 8). Forskellige frekvenser vil altså excitere basilarmembranen optimalt på forskellige steder. Dette er betinget af basilarmembranens større bredde og mindre stivhed op mod apex.

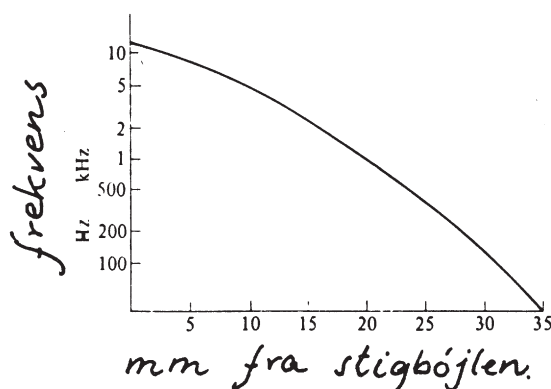


Fig. 8. Grafisk fremstilling af positionen for den maksimale amplitude af bølgen på basilarmembranen for forskellige frekvenser af rene toner. (Fra The New Grove Dictionary, London, 1980, art. »Hearing«).

Denne frekvens-for-sted transformation af lydsignalet på basilarmembranen kan også foregå, dersom lydsignalet er sammensat af f.eks. to simultane sinustoner. Allerede inden den neurale indkodning er der altså sket en slags frekvensanalyse af lyden.

Den neurale indkodnings første trin er, at basilarmembranens bevægelser påvirker hårcellerne, der er placeret i den cochleære deling over basilarmembranen. Hårcellerne har en vis spontan aktivitet, hvilket vil sige, at de »fyrrer« hele tiden. Dette har man imidlertid vænnet sig til, således at det ikke forårsager et lydindtryk. Idet hårene bøjes i en bestemt retning, vil sandsynligheden for at der fyres blive langt større. Den fysiske påvirkning af de enkelte hår kan både foregå ved direkte kontakt med tectorialmembranen, der er placeret over basilararmembranen, og ved væskestrømninger forårsaget af basilararmembranens bevægelser (fig. 9). Ud fra et nøje kendskab til de anatomiske og fysiologiske detaljer må man formode, at det er basilararmembranens bevægelser op mod scala vestibuli (svarende til undertryk i øregangen), som er de mest effektive og derfor excitatoriske. Dette synes bekræftet af neurologiske undersøgelser (se nedenfor).

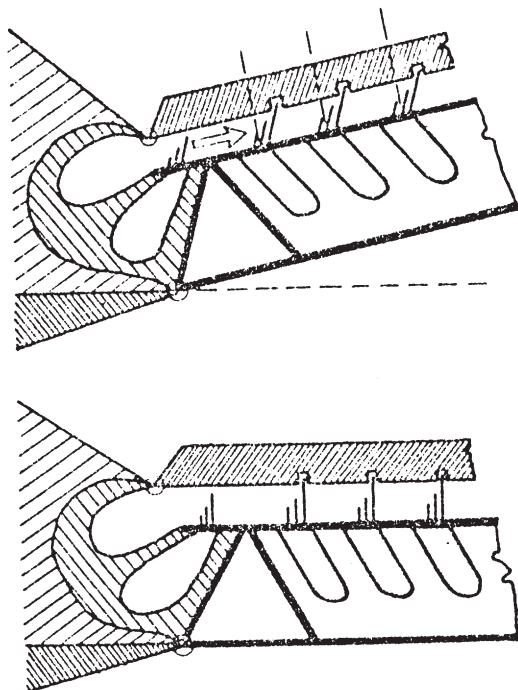


Fig. 9. Skematisk fremstilling af den måde, hvorpå hårcellerne påvirkes ved basilar-membranens forskydning. (Fra A. Ryan og P. Dallos: »Physiology of the inner ear« i *Communicative Disorders: Hearing Loss*, ed. J. L. Northern, Boston 1976).

Inden for de sidste 15 år er der foregået en intensiv forskning omkring nerveimpulser i enkeltneuroner i nervus acusticus f.eks. ved Kiang¹⁹, Brugge, Anderson, Hind og Rose²⁰, Rose²¹, Zwicker²², Smoorenburg et al.²³, de Boer og de Jongh²⁴.

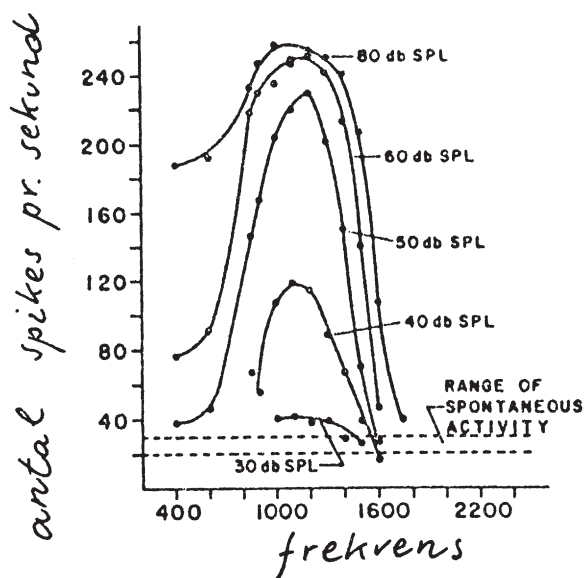


Fig. 10. Grafisk fremstilling af antallet af spikes pr. sekund for en bestemt nervefiber ved forskellige lydtrykniveauer. (Fra J. E. Rose, J. F. Brugge, D. J. Anderson, J. E. Hind: »Phase-locked response to low-frequency tones in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey« *J. Neurophysiol.* 30, 1967, pp. 769-793).

Nogle eksempler på en enkelt nervefibers respons på forskellige stimuli fremgår af fig. 10. Det ses, at denne nervefibers bedste respons ligger omkring 1050 Hz. Dette kaldes den karakteristiske frekvens. Endvidere fremgår det af figuren, at fyringshyppigheden ved en given frekvens stiger med lydtrykket. Ved den karakteristiske frekvens når fyringshyppigheden op på noget nær maksimum ved 60 dB lydtrykniveau. Nervefiberens fyringshyppighed når altså et mætningspunkt ved et vist lydtryk, afhængigt af frekvensen. Man kan forestille sig andre nervefibre, som først træder i funktion ved dette lydtrykniveau, og har deres mætningspunkt ved et endnu højere niveau.

Det fremgår af fig. 10, at nervefiberen er følsom for et ret stort frekvensområde fra ca. 400 til ca. 1700 Hz. Også andre undersøgelser bekræfter, at nervefibre er følsomme for et ret stort frekvensområde (se f. eks.¹⁹).

En enkelt nervefiber kan højst fyre ca. 500 spikes pr. sekund. Man har bl. a. af den grund i lang tid stillet sig tvivlende over for, hvorvidt det neurologiske signal var koblet synkront til stimulusfrekvensen. Imidlertid viser en undersøgelse af tidsintervallerne mellem enkeltfyringerne interessante træk. Det viser sig, at disse tidsintervaller grupperer sig om hele multipla af periodetiden. På fig. 11 ses ved A et udladningsmønster for en sinustone på 412 Hz. Periodetiden er 2,427 millisekunder. Den største gruppering er omkring dette

tidsinterval, den næststørste omkring det dobbelte osv. Selv om den enkelte nervefiber ikke afgiver en impuls for hver svingningsperiode, vil impulserne dog gruppere sig periodisk i overensstemmelse med stimulusfrekvensen. Da der imidlertid er mange nervefibre, der påvirkes samtidigt, kan man regne med en samlet synkronicitet mellem nerveimpulser og stimulusfrekvens. Fig. 12 a illustrerer skematisk, hvordan flere enkeltneurons fyringer virker samlet. I fig. 12 b er nerveimpulserne i et enkeltneuron opstillet i et periodehistogram, dvs. en grafisk fremstilling af en opsummering af fyringshyppighederne. Det må formodes, at dette billede svarer til flere neuroners samlede temporale udladningsmønster. Som det fremgår af denne figur og med endnu større tydelighed af fig. 14, kan det anses for sandsynligt, at det er basilar-membranens udbøjning i én retning, som er afgørende for nervesignalet. Dette synspunkt bekræftes af andre forskere som f. eks. Smoorenburg²³, Zwicker²², de Boer og de Jongh²⁴. Man kan altså som en første tilnærmelse antage, at kun den ene halvbølge af basilar-membranens svingning er af betydning for høre-indtrykket. Denne halvbølge er den opadgående, der som anført svarer til undertryk i øregangen.

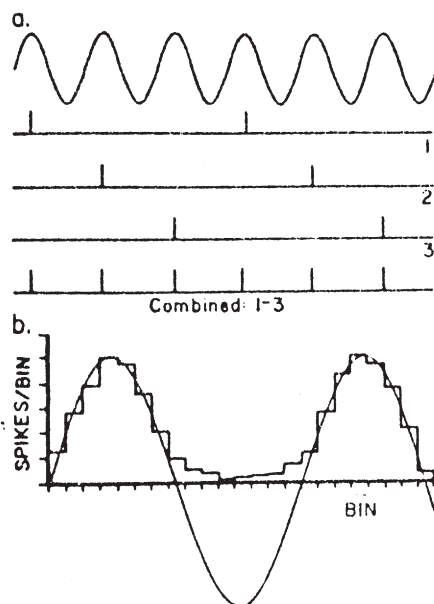


Fig. 12. Den temporale indkodning af frekvens-information. a, illustration af den samlede effekt af udladningerne fra tre forskellige nervefibre som respons på den rene tone, der er repræsenteret øverst; b, nerveudladningernes periodicitet manifesteret i et histogram over de spikes, der er observeret over en given periode. (Fra Durrant & Lovrinc: *Basis of Hearing Science*, 1977).

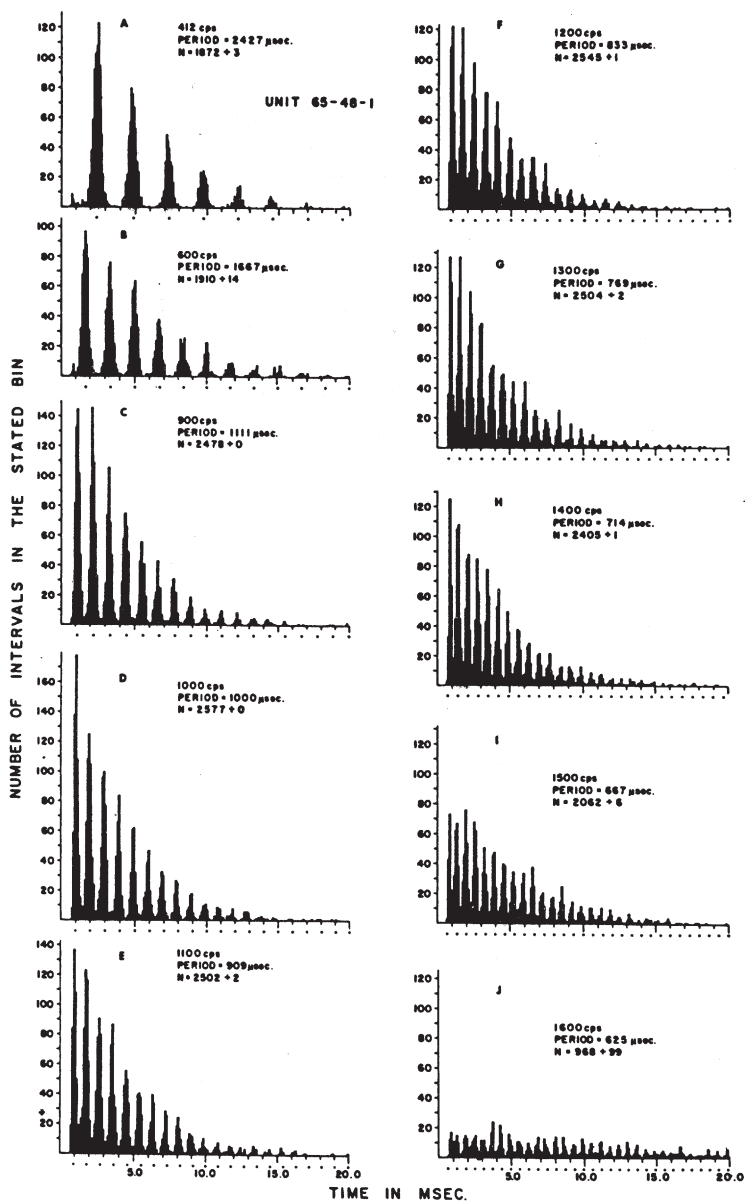


Fig. 11. Den periodiske fordeling af tidsintervaller mellem spikes, når en ren tone af variabel frekvens aktiverede en nervefiber. Stimulus-frekvens er angivet i hver af de grafiske fremstillinger. Intensitet af alle stimuli: 80 dB lydtrykniveau. (Fra Rose *et al.*, *op. cit.*).

Det fremgår i øvrigt af fig. 11, at synkroniciteten bliver mere udvisket for højere frekvenser.

Hvordan centralnervesystemet tolker disse signaler, er endnu uvist, men i hvert fald er det overraskende med den direkte og synkrone relation mellem stimulus-bølgeform og nerveudladning.

Denne relation lader os slutte, at der i høreprocessen for en enkelt sinustone nødvendigvis må være (mindst) *et punkt* på basilarmembranen, som svinger med stimulusfrekvensen. Enkeltneuronerne betjener ganske vist ofte flere hårceller, men disse vil være naboceller og derfor ikke spredt ud over et større areal.

Når øret opfatter en enkelt sinustone, vil der være aktivitet i et antal neuroner, som svarer til et bestemt område. Dersom tonens fysiske styrke øges, vil antallet af spikes stige af flere grunde: 1. Nogle enkeltneuroner vil fyre hyppigere. 2. Nye neuroner i det givne område vil inddrages, idet deres styrkefølsomheds-område nåes. 3. Den strækning af basilarmembranen, som svinger, vil blive længere, hvorved neuroner i naboområdet inddrages.

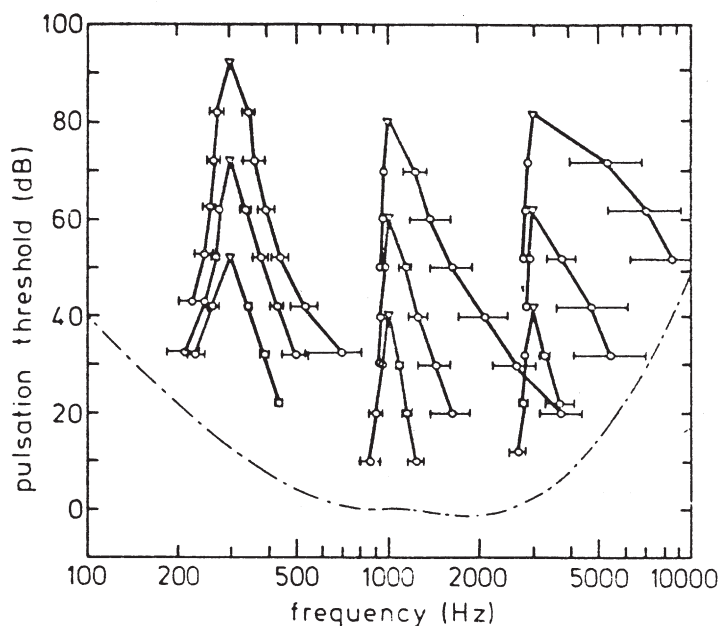


Fig. 13. Pulsationstærskel som funktion af frekvensen for sondetonen for stimuli af sinustoner med frekvens og lydtrykniveau angivet ved de trekantede symboler. De vandrette streger angiver standard-afvigelsen for 12 ører i 7 forsøgspersoner. Den stiplede linie repræsenterer høretærsklen. (Fra T. Houtgast: »Psychophysical experiments on »tuning curves« and »two-tone inhibition««. *Acustica* 29, 1973, pp. 168–179).

Fig. 13 giver et billede af nerveaktiviteten for tre forskellige sinustoner (300 Hz, 1000 Hz, 3000 Hz), hver ved tre forskellige lydtrykniveauer. Målingen er foretaget ved en speciel teknik (pulsationstærskel). Eksempelvis vil der ved en stimulustone på 300 Hz med et lydtrykniveau på 92 dB være nerveaktivitet i 500Hz-området svarende til en sinustone på 50 dB. Man kan godt opfatte dette bogstaveligt således, at 500Hz-tonens faktiske *sted* på basilarmembranen og de tilhørende neuroner er berørt i en grad svarende til denne stimulus. At denne påvirkning er mulig skyldes bl.a. enkeltneuronernes store frekvensfølsomhedsområde (fig. 10).

Ørets funktionsprocesser over for flere samtidige sinustoner vil blive beskrevet i det følgende.

2.3. Ørets opløsningsevne

Ved opløsningsevne som et generelt sensorisk begreb forstår man evnen til at skelne flere samtidige stimuli fra hinanden. For synssansen beskrives opløsningsevnen som den vinkelafstand, der mindst skal være mellem to punkter, for at de opfattes som to og ikke som ét enkelt punkt, og for følesansens vedkommende kan det f. eks. dreje sig om, hvor lang afstand, der skal være mellem to nålestik på huden, for at disse opfattes som værende på to forskellige steder. For høresansens vedkommende betyder opløsningsevnen muligheden for at skelne flere samtidige toner fra hinanden. Som baggrund for en fænomenologisk beskrivelse af opløsningsevnen vil nogle afgørende fysiologiske og neurologiske forhold først blive omtalt.

Fig. 14 viser målinger på et bestemt neuron, som er følsomt både for en tone på 798 Hz og en på 1064 Hz (disse toner danner et kvartinterval). Når neuronet påvirkes med begge disse toner *samtidigt*, kan der alt efter styrkeforholdet mellem tonerne opstå tre principielt forskellige situationer: 1. Den dybeste tone kan dominere og forhindre den højeste i at manifestere sig (f. eks. A₁, B₁, C₁). 2. Den højeste tone kan dominere på samme måde (tydeligst ved C₆). 3. Ved visse styrkeforhold manifesterer begge toner sig (f. eks. A₅, B₅, C₅). I disse tilfælde viser periodehistogrammet et billede af den sammensatte svingning med den karakteristiske indhylningskurve. Det *sted* på basilarmembranen, som disse periodehistogrammer relaterer sig til, må nødvendigvis også udføre den sammensatte svingning. Man kan generelt slutte sig til, at der ved stimuli bestående af to simultane sinustoner kan være *steder* på basilarmembranen, der kun giver respons på den ene tone, og *steder*, der kun giver respons på den anden tone og *mellemliggende steder*, der mere eller mindre udtalt giver respons på begge og derfor transmitterer den sammensatte svingning til centralnervesystemet, hvor den måske opfattes. Forskellige former for interaktion mellem enkelttoner, som f. eks. ruhed, skyldes formodentlig, at den sammensatte svingning således manifesterer sig.

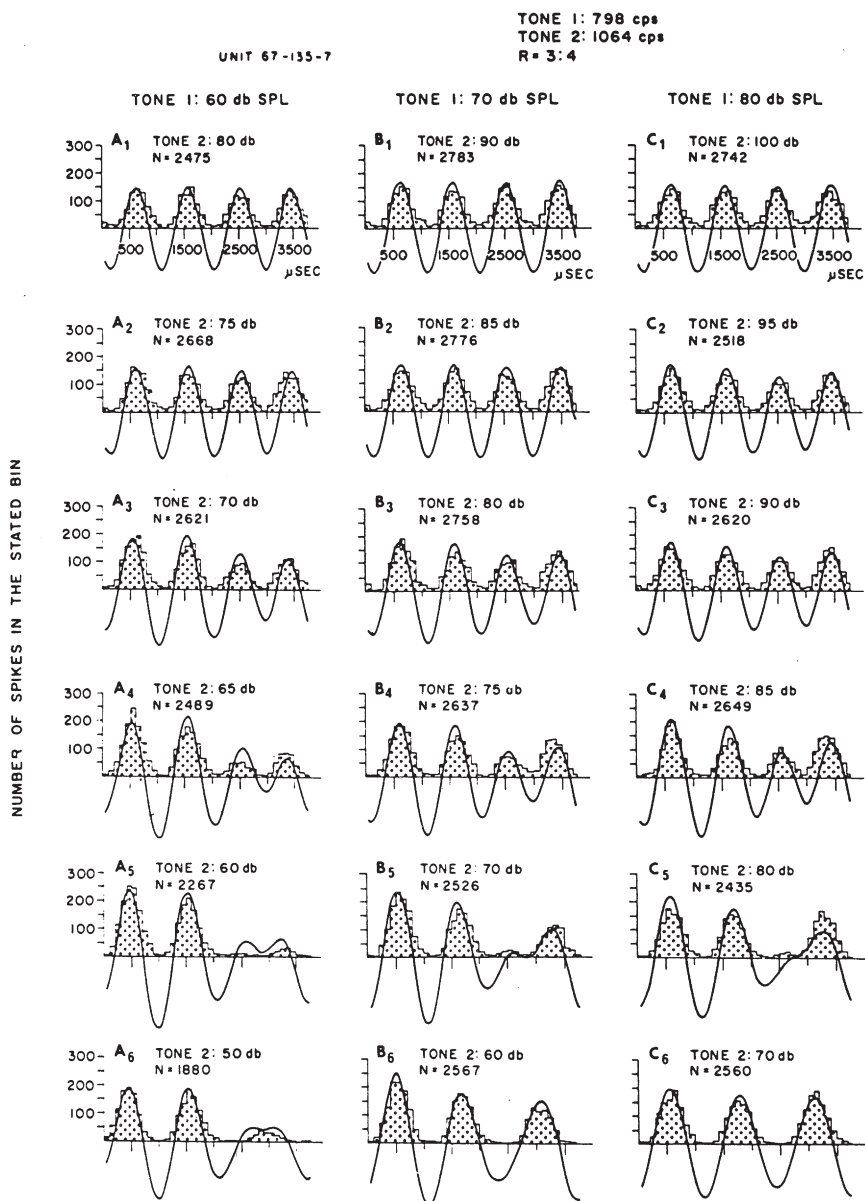


Fig. 14. Periodehistogrammer over fordelingerne af spikes i respons på en sammensat stimulus bestående af to sinustoner, hvis styrkeforhold varieres. Tonerne er fastlåst i frekvensforholdet 3:4. De anvendte toner er på 798 Hz og 1.064 Hz. (Fra²⁰).

Ørets funktion som frekvensanalysator over for to simultane sinustoner kan, alt efter omstændighederne, resultere i: 1. Fuldstændig opløsning. 2. Ingen opløsning. 3. Delvis opløsning. Disse muligheder skal eksemplificeres.

1. *Fuldstændig opløsning.* Et lydsignal bestående af to simultane sinustoner på henhv. 300 Hz og 1000 Hz med lige store amplituder vil danne en sammensat svingning som vist i fig. 15.

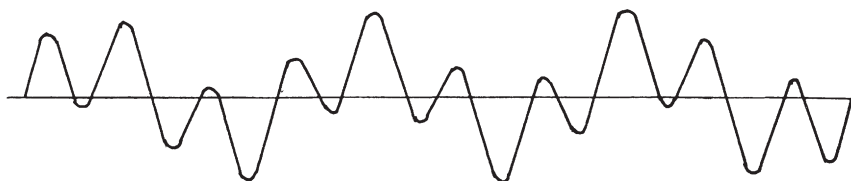


Fig. 15. S sammensat bølgeform af to sinustoner med ens amplituder og frekvensforhold $m:n = 3:10$.

Denne sammensatte bølge rammer trommehinden. Ørets funktion som frekvensanalysator vil i denne situation resultere i en perfekt opløsning, for som det fremgår af fig. 13, vil der ved de højere lydtrykniveauer ikke være nervefibre, som reagerer på både den ene og den anden tone. Der vil altså være ét sæt nervefibre, svarende til et bestemt *sted* på basilarmembranen, der aktiveres med en frekvens på 300 Hz, og et andet sæt nervefibre et andet *sted*, der aktiveres med en frekvens på 1000 Hz. Når adskillelsen, som her, er fuldstændig, dannes høreindtrykket af de to komponenter klart hver for sig, og der kan aldrig blive tale om interaktion, såsom svævninger eller ruhed, mellem tonerne.

2. *Ingen opløsning.* Som et andet eksempel kan man tage to sinustoner med samme amplitude og kun ganske lille frekvensforskel, f. eks. på 100 Hz og 105 Hz. I dette tilfælde opfattes mellemfrekvensen 102,5 Hz, og den sammensatte svingnings periodiske udsving fem gange i sekundet vil forårsage fluktuationer i hørestyrken (svævninger). I dette eksempel har øret ikke formået at opløse signalet i dets grundbestanddele.

3. *Delvis opløsning.* I den delvise opløsning skelnes tonerne hver for sig, men der er samtidig interaktion mellem dem i form af svævninger eller ruhed.

2.4. Kritiske båndbredder

De *kritiske båndbredder* er nogle hørepsykologisk definerede frekvensområder, der indikerer vigtige overgange i den neurale indkodning og dermed i lydopfattelsen. Som en slags model for opløsningsevnen kan man sætte en række filtre, og jo større disse filters selektivitet er, des bedre vil frekvensopløsningen være. Et filters selektivitet er defineret ved dets båndbredde, dvs. det større eller mindre frekvensområde, det lader slippe igennem. De kritiske båndbredder kan både defineres ud fra frekvensopløsning og hørestyrke.

En definition ud fra *frekvensopløsning* kan foregå ved, at man undersøger, hvor mange deltoner i en kompleks tone, der kan skelnes enkeltvis. Som omtalt i afsnit 2.1. lytter man jo normalt ikke ind på de enkelte deltoner, men ved særlige lytteforsøg kan dette gøres muligt. Det viser sig, at man normalt kan skelne de første 5–7 deltoner, hvis disse ellers er lige kraftige. Hvis første deltone er lavere end 60 Hz, er det dog ikke muligt at skelne helt så højt op i overtonerækken. Den bredt stiplede kurve i fig. 16 viser de kritiske båndbredder defineret efter dette princip.

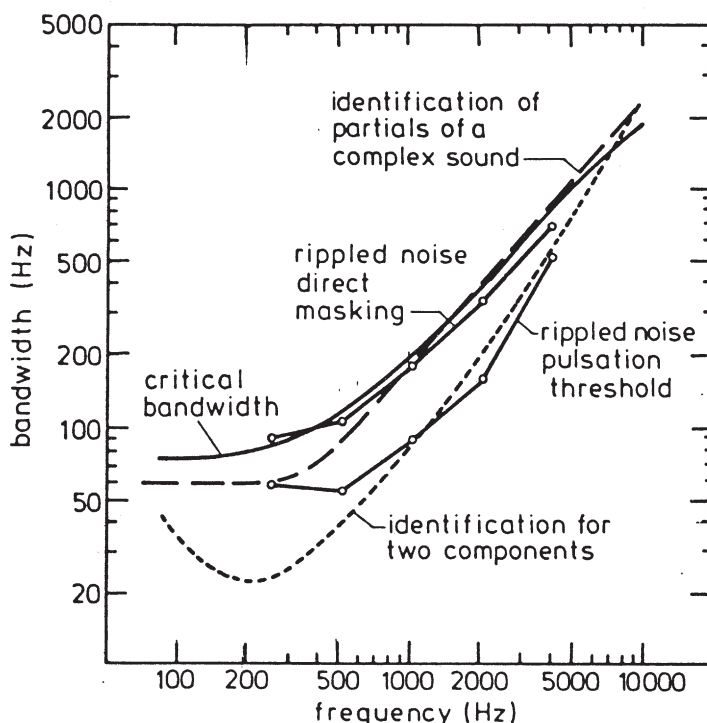


Fig. 16. Sammenligning mellem de forskellige vurderinger af høresystemets filter-båndbredde. (Fra¹⁴).

Ud fra *hørestyrken* bestemmes de kritiske bånd som frekvensområder, inden for hvilke hørestyrken er konstant, blot det samlede lydtryk er konstant. Den øverste ubrudte kurve i fig. 16 viser de kritiske båndbredder defineret på denne måde.

De andre kurver i fig. 16 skal ikke kommenteres. Deres tilstedeværelse antyder blot, at ørets mekanisme som frekvensanalysator er langt mere kompliceret, end en simpel filter-model lader forstå.

For lyde over 280 Hz er den kritiske båndbredde ca. en stor tert, i området 180–280 Hz ca. en lille sekst, og under 180 Hz ca. en oktav. Båndenes beliggenhed er ikke fikseret, dvs. der er flydende overgange. Det er derfor egentlig misvisende at foretage en fikseret udlægning, hvor båndenes grænser støder sammen, men da et nodebillede måske illustrerer forholdene bedre end en kurve, har jeg foretaget en fikseret udlægning i fig. 17, som altså skal tages med et vist forbehold.

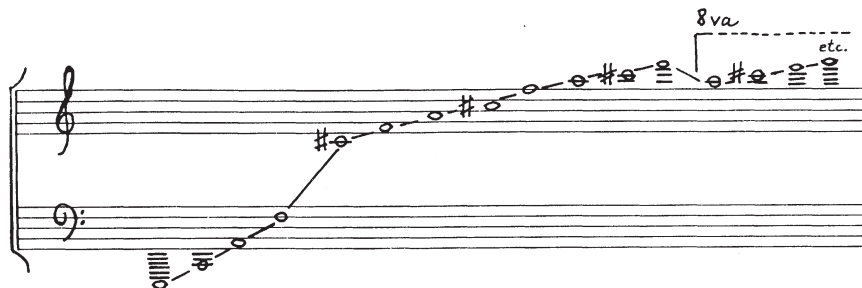


Fig. 17. Eksempel på fikseret udlægning af de kritiske båndbredder.

2.5. Kombinationstoner

To simultane toner kan give anledning til, at man hører én eller flere toner ud over det oprindelige signal. Disse kombinationstoner, som de normalt kaldes, dannes i øret. Den egentlige mekanisme bag deres opståen er endnu ikke afdækket fuldt ud. De kan i deres fysiske eller psykiske karakter ikke skelnes fra faktiske sinustoner udefra, hvilket vil sige, at de kan maskeres af en anden tone og at de kan forårsage svævninger med en tone af omtrent samme frekvens.

Den almindeligste kombinationstone er *differenstonen*. Dersom to sinustoner med frekvenserne henhv. f_1 og f_2 forårsager en differenstone, vil denne have frekvensen $f_2 - f_1$. Der findes omtaler af differenstonen helt tilbage i 1700-tallet hos Sorge²⁵, Romieu, samt den italienske violinist og komponist Tartini.²⁶ Differenstoner omtales undertiden som Tartini-toner.

Ud over differenstonen findes der andre kombinationstoner, hvoraf de almindeligste har frekvenserne: $2f_1 - f_2$, $3f_1 - 2f_2$, $4f_1 - 3f_2$. Figur 18 giver et indtryk af hørligheden af forskellige kombinationstoner. Det ses, at der er ret store individuelle forskelle i de fire forsøgspersoners opfattelse, og at kombinationstonerne høres bedst ved høje lydtrykniveauer.

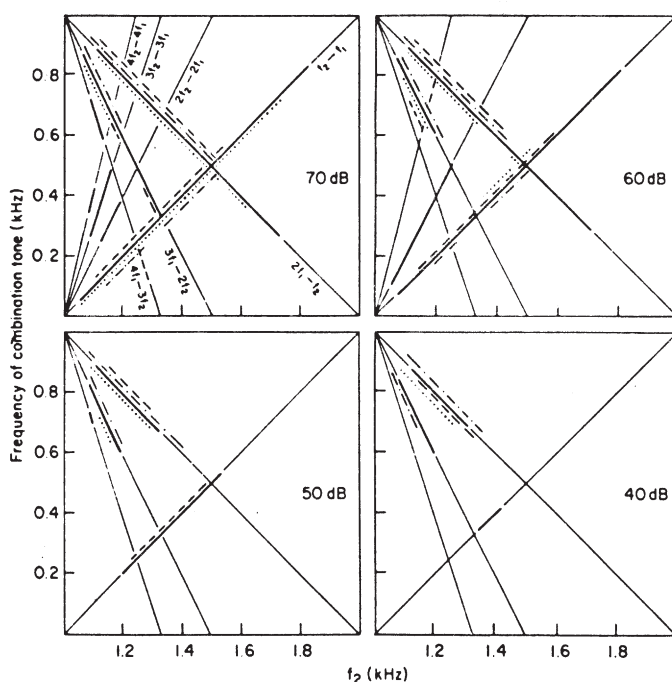


Fig. 18. Frekvensområder, hvor særskilte kombinationstoner kunne høres, for primærtone på henholdsvis 70, 60, 50 og 40 dB lydtrykniveau. Frekvensen af den dybeste tone, f_1 , var 1000 Hz. Frekvensen af den højeste tone, f_2 , varieredes fra 1000 op til 2000 Hz. De tynde linier svarer til de forskellige teoretisk mulige kombinationstoner, de bredere og stiplede linier repræsenterer resultaterne for fire forskellige forsøgspersoner. (Tilpasset fra R. Plomp: »Detectability threshold for combination tones«. *J. Acoust. Soc. Amer.* 37, 1965, pp. 1110–1123).

Man har i undersøgelser af kombinationstonerne dels søgt efter den fysiologiske mekanisme, som betinger dem, dels søgt at beskrive dem fænomenologisk. Fænomenologien er i dag velkendt, mens man som omtalt endnu ikke har fuld klarhed over deres opståen. von Helmholtz lokaliserede mellemøret som det sted, hvor de opstår, og gik ud fra, at det var den ikke fuldstændige elasticitet i visse medsvingende dele, som forårsagede »nonlineære effekter«. Selv om denne forklaring mødte megen modstand hos adskillige efterfølgende forskere, anser man i dag alligevel nonlinearitet ved »overbelastning og forvrængning« i mellemøret eller cochlea som hovedårsagen til ihvertfald differensstonens opståen. De andre kombinationstoners opførsel lader sig ikke forklare fyldestgørende ud fra dette forhold. Man må antage, at kombinationstonerne, ihvertfald til dels, ikke indkodes før ørets frekvens-analyse, men at de er kobledede tæt sammen med denne.

Som det fremgik af fig. 18, er der ret store individuelle forskelle i, hvornår man hører kombinationstonerne. De fleste musikere kender dem dog fra praksis, f. eks. ved to fløjter eller trompeter i et lokale med god efterklang. De fleste, der er blevet gjort opmærksom på kombinationstonerne, kan ligesom lokalisere et »sted« inde i øret, hvor de klinger. Dermed kan man lære at afgøre, om man opfatter kombinationstoner eller ej. Den meget udbredte opfattelse, at kombinationstoner næsten altid er til stede og spiller en afgørende rolle for klangbilledet, selv om den lyttende ikke er klar over det, forekommer derfor ret urimelig.

2.6. Svævninger ved forstemt konsonans mellem sinustoner

To sinustoner med en meget lille forskel i frekvens, f. eks. 2 Hz, vil give anledning til, at man hører en enkelt tone med to svævninger i sekundet. (smlgn. afsnit 2.3). Svævningsfænomenet findes også ved overtonesammenstød. Som eksempel kan man tage et forstemt kvint-interval mellem to komplekse toner på henhv. 200 og 301 Hz. Der vil her være et sammenstød mellem de to overtoner på henhv. 600 og 602 Hz. Dette forhold har været kendt længe, men det var først forrige århundrede, man fandt ud af, at man også kan høre svævninger ved forstemt konsonans mellem sinustoner. Fænomenet er senere blevet udforsket, og man har forsøgt at forklare det på forskellig vis.²⁷

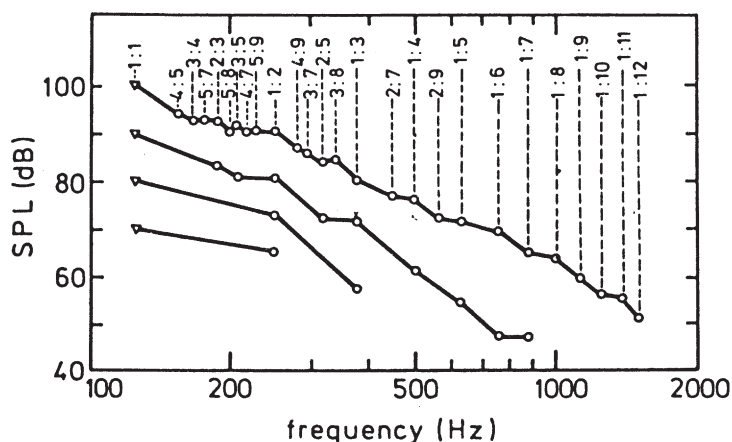


Fig. 19. Grafisk fremstilling af det lydtrykniveau, der giver de tydeligste svævninger af forstemt konsonans, vist som funktion af frekvensen (gennemsnitsværdier for fire forsøgspersoner). Niveauet af den konstante dybeste tone er vist med trekantsymboler. Ved 100-dB-tonen er angivet de frekvensforhold, omkring hvilke der kunne høres svævninger. (Fra²⁷).

Figur 19 giver et indtryk af disse svævnings hørbarhed. Der er tale om forskellige intervaller med en tone på 125 Hz som den dybeste komponent. Styrken for den højeste komponent er reguleret til det lydtrykniveau, som giver de tydeligste svævninger. Som det fremgår af figuren, er svævningerne hyppigst forekommende ved høje lydtrykniveauer.

Man har forsøgt at forklare fænomenet ud fra kombinationstoner. Af de mulige kombinationstoner mellem de to komponenter på henhv. 200 og 301 Hz er der først og fremmest differenstonen $f_2 - f_1$ på 101 Hz og $2f_1 - f_2$ på 99 Hz. Da disse toner hørefysiologisk opfører sig ligesom »rigtige« toner, kan der opstå svævninger mellem dem, igen to svævninger pr. sekund. Imidlertid kan man sikre sig, at den svævning, der høres, ikke stammer fra kombinationstonerne, ved at man lægger et »støjband«, som maskerer 100 Hz-området. På den måde får man et klart billede af, i hvilke tilfælde svævningerne skyldes kombinationstoner, og i hvilke tilfælde der er andre årsager. I registre over 2000 Hz skyldes alle svævningerne kombinationstoner. I de dybere toneområder kan der både være svævninger af den ene og den anden art. Kombinationstoner kan altså ikke være fænomenets egentlige årsag.

En anden hypotese går ud på, at øret selv danner harmoniske overtoner, »aurale overtoner«, og at svævningerne opstår mellem disse. I eksemplet fra før skulle svævningerne finde sted mellem de to »aurale overtoner« på henhv. 600 og 602 Hz. Imidlertid forsvinder svævningerne ikke, selv om man maskerer 600 Hz-området med et støjband. De »aurale overtoner« har været meget omtalt i faglitteraturen, men beviset for dem har egentlig kun været netop disse svævninger ved forstemt konsonans. Man har altså forklaret noget ukendt med noget andet ukendt! På baggrund af sine egne meget grundige undersøgelser på området og efter at have diskuteret andre forskeres resultater slår Plomp fast, at »the experimental evidence presented in this section failed to demonstrate, that aural harmonics exist«. (se¹⁴, p. 53).

Svævninger ved forstemt konsonans må ifølge Plomp forklares ud fra ørets følsomhed over for variationer i den sammensatte bølgeform. Svævningsfrekvensen stemmer da også netop overens med de cykliske variationer i bølgeformen. En forstemt oktav vil således gradvist skifte mellem de fire bølgeformer vist i fig. 3, e, f, g, h, – én gang for hver hørbar svævning. Da bølgeformen i fig. 3f rent faktisk er den, der høres som den kraftigste²⁸, kunne man formode, at fænomenet enten havde med spidsværdien eller med »energiindholdets« maksimum i den negative halvbølge at gøre, men præcis hvilken detalje i variationerne, der er afgørende, kan næppe endnu afgøres. Under alle omstændigheder må disse svævninger ved forstemt konsonans forstås som eksempler på, hvordan den sammensatte bølgeform – ud fra mekanismerne ved ørets opløsningsevne – manifesterer sig i høreindtrykket.

2.7. Residual tonehøjde

De fleste toner, der forekommer i en musikalsk sammenhæng, er som tidligere nævnt komplekse toner med harmoniske spektre (afsnit 2.1). Selv om vi under visse omstændigheder er i stand til at høre de laveste 5–7 deltoner særskilt og

skelne deres tonehøjder, opfatter vi normalt en kompleks tone som én gestalt, dvs. én tone med en bestemt klangfarve, der er afhængig af overtonernes antal og styrkeforhold, og én bestemt tonehøjde, svarende til den, vi opfatter, når vi hører grundtonen isoleret.

Fænomenet *residual tonehøjde*, der også kaldes »low pitch«, »periodicity pitch« eller »time separation pitch«, indebærer populært sagt, at man i en kompleks tone hører grundtonen, selv om denne ikke er fysisk til stede. Man bruger da også betegnelsen »missing fundamental«. Den manglende grundtone høres tydeligst i et område mellem 150 og 500 Hz, når der er overtoner under ca. 2500 Hz. Jo flere og jo kraftigere overtoner, der er til stede, des mere distinkt opfattes den manglende grundtones tonehøjde. Tonehøjdesammenligninger med andre toner kan være vanskelige, hvis klangfarverne er væsensforskellige. Den komplekse tone uden grundtone har en ikke særlig fyldig, ofte snerrende klangkarakter. Man kan opfatte flere »missing fundamentals« samtidigt. Det er residualeffekten, der gør det muligt at høre musik og forstå tale, selv om alle frekvenser under 500 Hz, ja selv under 1000 Hz er skåret bort. Dette kan f. eks. være tilfældet i en billig transistorradio.

v. Helmholtz antog som bekendt, at den første harmoniske er bestemmende for tonehøjden, fordi den normalt er den kraftigste komponent. Det er først op i dette århundrede, at man har anfægtet dette synspunkt. Man har ganske vist tidligere undret sig over, at tonehøjdeopfattelsen ikke ændres ved, at man fjerner den 1. harmoniske, men dette er blevet forklaret ved, at øret gendanner denne komponent ved nonlinear distortion.²⁹ Senere har Schouten, omkring 1940, gjort nogle forsøg, hvor grundtonen blev udelukket, og nået frem til den overbevisning, at det er de højere overtoners kollektive bølgeform, der giver anledning til residual-tonehøjden.³⁰ Nogle forsøg i 1950'erne har vist, at man stadig hører den manglende grundtone, selv om der bliver lagt et støjbånd ind, som skal maskere den »genintroducerede« komponent.³¹ Senere forsøg har bekræftet dette. Man må altså antage, at en gruppe højere overtoner på en eller anden måde er i stand til at give anledning til den samme tonehøjdefornemmelse som grundtonen.

Spørgsmålet er så, om disse højere overtoner først og fremmest er nogle, der ligger så højt, at øret ikke kan skelne de enkelte, eller det netop er nogle, der ligger inden for opløsningsevnen og kan høres særskilt.

Schouten var som ovenfor anført overbevist om, at det er de højere overtoners kollektive bølgeform, der er afgørende, og dermed er selvfølgelig forudsat, at disse ikke er opløst fuldstændigt. Figur 20 viser, hvordan dette eventuelt kan forstås. Kurven fremstiller den sammensatte svingning for fem sinustoner med frekvensforholdene 15:16:17:18:19, alle med samme amplitude. De dækker et frekvensområde på størrelse med den kritiske båndbredde i et af de højere registre. Denne kollektive bølgeforms indhylningskurve er kraftigt profileret, og det er derfor nærliggende at tro, at øret bedømmer tonehøjden ud fra denne overordnede periodicitet, der jo svarer til grundtonens.

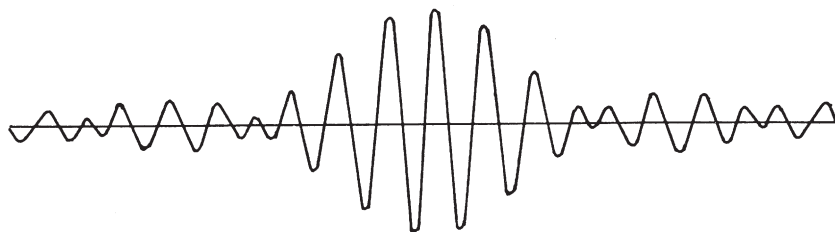


Fig. 20. Den sammensatte bølgeform af 15., 16., 17., 18. og 19. harmoniske, alle med ens amplituder.

På baggrund af en lang række forsøg i 1960'erne og 70'erne er man i dag dog tilbøjelig til at tro, at det snarere er nogle af de lavere, opløste deltoner end de højere uopløste, som er afgørende for residual-tonehøjden. Selv om den kollektive bølgeform spiller en vis rolle, er den altså næppe altafgørende i den tilsyneladende meget komplicerede tonehøjde-ekstraktionsmekanisme; det er ihvert fald den konklusion, som Plomp kommer frem til (se¹⁴, p. 111ff.). Fænomenet er ikke udforsket til bunds, så det er stadigvæk en gåde, at man kan filtrere lyden, f. eks. fra optagelsen af en wienerklassisk symfoni således, at man kun hører den del af lyden, der ligger mellem 1000 og 1500 Hz, og selv om klangen ikke er god, kan man alligevel genkende alle instrumenter, forstå melodiken og endda opfatte harmoniken! Der er lignende forhold ved taleoverføring. Residual-mekanismen, der jo også er i funktion, når de lavere komponenter er til stede, har måske noget med selve gestaltdannelsen i perceptionen at gøre.

2.8. *Ruhed*

Ruhedsbegrebet er som tidligere omtalt opstået i den nyere psyko-akustiske forskning ud fra ønsket om at undersøge samklangsforhold empirisk uden at være tynget af konsonans/dissonans-begrebets forskellige musikteoretiske og historiske betydninger. Inden for de sidste 15 år er der publiceret en lang række artikler om, hvordan vi opfatter ruhed. Terminologien i dette materiale er centreret omkring »ruhed«, men ofte sker der en begrundet eller ubegrundet drejning over mod »konsonans«, »dissonans«, »tonal dissonans« eller lignende, hvilket ofte fremgår af titlerne. I mange tilfælde kan der i høj grad sættes spørgsmålstegn ved denne terminologi, når konsonans/dissonans-begrebets musikteoretiske og -historiske aspekter skal tilgodeses. Denne problematik vil blive diskuteret i næste hovedafsnit. Diskussionen i nærværende afsnit vil udelukkende dreje sig om samklangsforhold anskuet ud fra det fysiske eller sensoriske definerede ruhedsbegreb. Af praktiske grunde vil kun termen »ruhed« blive anvendt, selv i tilfælde, hvor der refereres til en artikel af anden terminologisk observans. Ligeledes vil betegnelserne »mere eller mindre dissonerende / konsonerende« blive undgået, da man faktisk med dem

har forladt det musikteoretiske konsonans/ dissonans-begreb til fordel for det sensoriske.

Det enkleste akustiske signal, som kan forårsage ruhed, er to simultane sinustoner. Der viser sig her en nøje sammenhæng mellem de kritiske bånd og ruheden. Forholdene fremgår af fig. 21, hvis abscissen afbilder frekvensforskellen mellem komponenterne med den kritiske båndbredde som énhed, og ordinaten i nedadgående retning ude til højre angiver »dissonance«, der altså her skal læses som »ruhedsgrad«. Ordinatskalaerne er arbitrære. Det fremgår af figuren, at ruheden er maksimal ved en frekvensforskel på ca. $\frac{1}{4}$ af den kritiske båndbredde. Ved frekvensforskelle, som er mindre, er ruheden også mindre. En frekvensforskel på nogle få Hz giver som tidligere omtalt anledning til svævninger. Når forskellen gøres større, op til ca. 20 Hz, kan øret ikke følge enkeltsvævningerne mere, lydindtrykket bliver af en rullende eller snerrende karakter og giver en ruhedsfornemmelse, der kulminerer ved ca. $\frac{1}{4}$ af den kritiske båndbredde. Hvis frekvensforskellen øges til den kritiske båndbredde eller derover, vil ruheden være forsvindende. Den viste kurve er omtrent ens i forskellige registre.

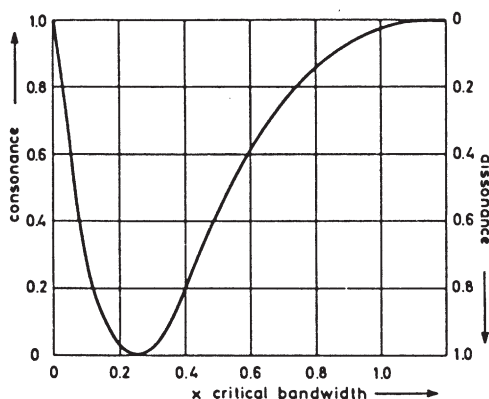


Fig. 21. Standardkurve, der repræsenterer konsonans [læs: manglende ruhed] af to rene toner, som funktion af frekvensforskellen med den kritiske båndbredde som enhed. (Fra³²).

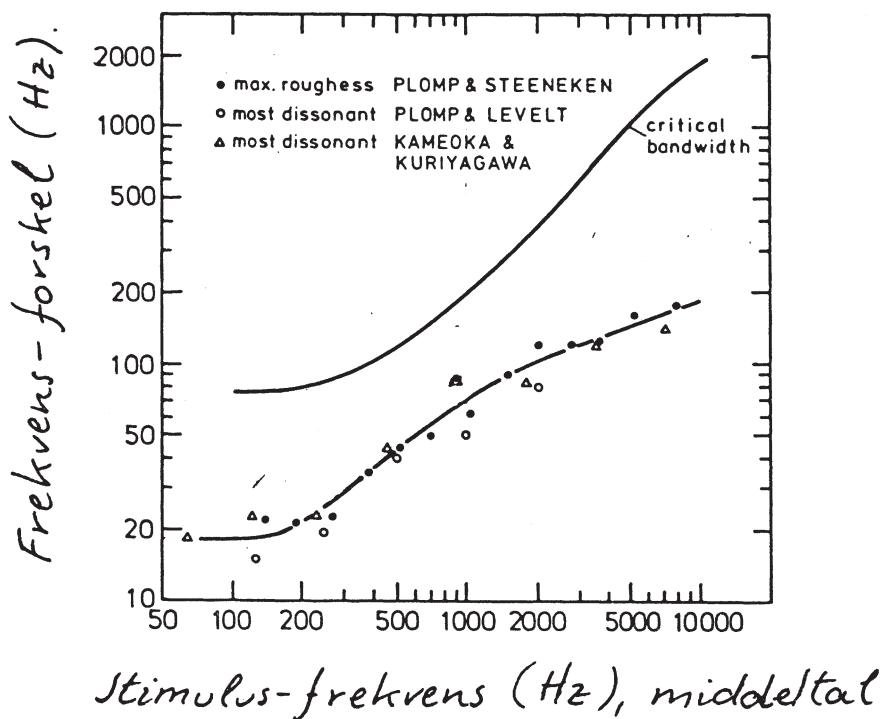


Fig. 22. Fremstilling af den frekvensforskel mellem to rene toner, der giver maksimal ruhed (udfyldte symboler) og maksimal dissonans (åbne symboler) som funktion af middelfrekvensen $\frac{1}{2}(f_1 + f_2)$. Disse data er sammenlignet med den kritiske båndbredde. (Tilpasset fra¹⁴).

Da den kritiske båndbredde er forskellig i forskellige registre, vil den frekvensforskel, som giver maksimal ruhed mellem to sinustoner variere i forskellige registre. Netop denne frekvensforskel er afbildet ved den nederste kurve i fig. 22. Den frekvensforskel, der giver maksimal ruhed for frekvenser under 200 Hz er ca. 20 Hz, derefter stiger den til ca. 70 Hz i 1.000 Hz området og yderligere til ca. 130 Hz i 10.000 Hz-området.

De eksperimentelle data bag kurven i fig. 21 og den nederste kurve i fig. 22 er fremkommet ved lytteforsøg med bedømmelse af ruheden ud fra en 7-punkts skala.³² Disse data er blevet bekræftet af en række forsøg med parvise sammenligninger (»incomplete paired comparisons«) af ruheden, som er foretaget af Kameoka og Kuriyagawa. Disse to forskere har imidlertid også interesseret sig for fastlæggelsen af en veldefineret skala for ruhed. Dette er foregået ud fra generelle sanse-teoretiske overvejelser, og skalaen kan både udtrykkes som »absolut« eller »relativ« dissonans (læs: ruhed). Fordelen ved at få skalaen for ruheden har blandt andet været, at det åbner mulighed for at kalkulere ruhedsgraden på forhånd ud fra en række matematiske formelopstillinger og

sammenligne med de empirisk fundne værdier. Kameoka og Kuriyagawa giver således både en fænomenologisk undersøgelse af ruheden mellem to sinustoner, der ikke nødvendigvis er på samme lydtrykniveau, og en matematisk beregningsmetode for ruheden.¹⁸ Beregningsmetoden bygger på de empiriske fakta, der er afbildet i fig. 22 samt de kritiske båndbredder.

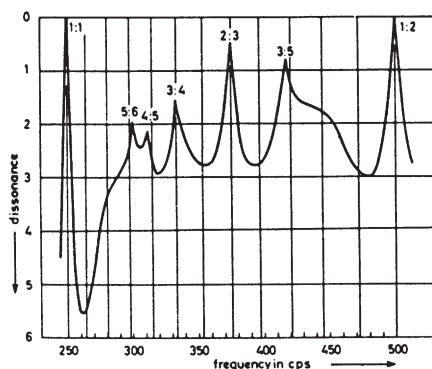


Fig. 23. Illustration af den måde, hvorpå konsonans [læs: manglende ruhed] af et interval med en dybeste kompleks tone på 250 Hz og en variabel højere tone afhænger af denne tones frekvens. Begge komplekse toner består af 6 harmoniske. De lodrette linier repræsenterer intervalstørrelsen efter den ligesvævende tempererede skala. (Fra³²).

Den nyere forskning har også undersøgt ruheden for samklange mellem komplekse toner. Plomp og Levelt har udarbejdet en kurve over ruheden mellem to komplekse toner, hver med seks harmoniske med ens amplituder, hvor den ene tone har frekvensen 250 Hz og den anden varierer fra 250 Hz op til 500 Hz (se fig. 23). Grundlaget for beregningerne er den formodning, at man kan addere ruhedsgraden mellem alle parvise deltonesammenstød.

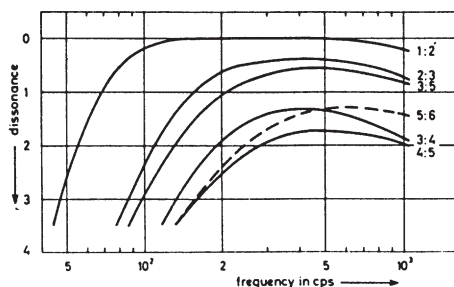


Fig. 24. Illustration af den måde, hvorpå konsonans [læs: manglende ruhed] af nogle intervaller med simple talforhold afhænger af frekvensen af den dybeste tone i intervallet. Begge komplekse toner består af 6 harmoniske. (Fra³²).

Kurverne i fig. 24, der er udarbejdet på grundlag af den samme formodning, viser, hvorledes ruhedsgraden for seks forskellige intervaller afhænger af registret. Kurverne viser, at alle seks intervaller høres mere ru i det dybe register, hvilket uden tvivl kan henføres til, at den kritiske båndbredde her er større og flere deltonepar derfor kommer i nærheden af maksimal ruhed. Kameoka og Kuriyagawa har ud fra videre sanseteoretiske overvejelser, herunder inddragelse af »energiloven«, udvidet deres kalkulationsmetoder til ruhedsgrader for komplekse toner med forskellige overtoneindhold, og igen har de kunnet konstatere tilfredsstillende overensstemmelse mellem den ruhedsgrad, der er fundet ved sammenlignende lytteforsøg og den beregnede ruhedsgrad.¹⁸ Der er tale om et eminent videnskabeligt arbejde.

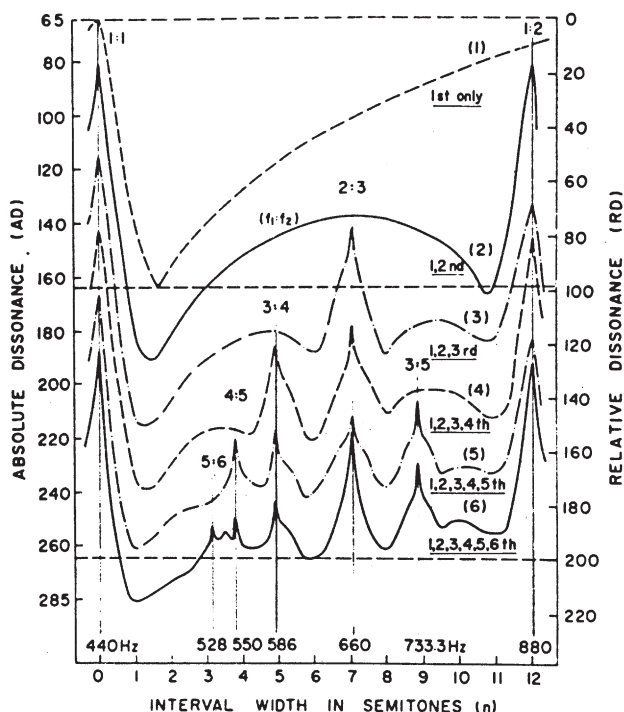


Fig. 25. Tonal dissonans [læs: ruhed] for en stimulus, der består af en konstant tone på 440 Hz og en tone, der varierer fra 440 til 880 Hz, begge ved 57 dB lydtrykniveau. Parameter er antallet af harmoniske, der er taget i betragtning. Kurverne er udregnet som summen af dissonansbidragene fra alle sammenstødende deltonepar. (Fra¹⁸).

Fig. 25 viser en beregning af ruheden for to toner, hvor den dybeste konstant holdes på 440 Hz, og den højeste varierer mellem 440 Hz og 880 Hz. Overtoneindholdet er varieret, således at den øverste kurve viser forholdene uden overtoner og den nederste forholdene, når begge komponenter indeholder 6 deltoner. Alle deltoner er lige kraftige. Det ses, at dissonansgraden (læs: ruhedsgraden) tiltager med større overtoneindhold, selv for prim-intervallet: En enkelt tone lader sig altså opfatte som mere eller mindre ru. Endvidere ses der flere og flere »spidser« ved forskellige simple intervalforhold ved stigende overtoneindhold. Disse spidser, der er mest udtalte ved oktav og kvint, skyldes, at dersom intervallet er forstemt, vil de sammenfaldende overtoner frembringe en svævning. Ved fuldstændig renstemning forsvinder disse svævnings, og intervallets ruhedsgrad når et minimum. Beliggenheden af disse sammenfaldende overtoner ved forskellige intervaller er vist ved eksempler i fig. 26. Overtonesammenstødene ligger på frekvenser, der danner en harmonisk serie (1:2:3:4 osv.). Det laveste overtone-sammenstød ligger ved frekvensen $f_1 \times m \times n$, som det fremgår af figuren. Jo større produktet $m \times n$ er, des højere oppe vil de sammenfaldende overtoner ligge, og des svagere vil de implicerede overtoner normalt være. Derfor bliver der tale om virkelig påfaldende overtone-sammenstød ved de intervaller, der har de helt enkle talforhold, som f. eks. oktav og kvint, – i modsætning til sammenstødene f. eks. ved de ufuldkomne konsonanser. Den eksakte renstemning af en oktav er da også langt mere kritisk end for en tert – et forhold, der er velkendt for de fleste musikere. Svævningsfrekvensen ved det laveste overtone-sammenstød ved en forstemning på x Hz af den øverste komponent i f. eks. den store sekst (3:5) vil være: $440 \cdot 5 - (733\frac{1}{3} + x) \cdot 3 = 3x$ Hz. Generelt er den $n \cdot x$ Hz, eller $m \cdot x$ Hz, hvis det er den anden komponent, der forstemmes, og vil altså være højest ved de intervaller, der har de mest komplicerede talforhold. Man må gå ud fra, at de ganske vist hurtigere, men styrkemæssigt svagere og dermed mindre påfaldende svævnings ved de mere komplicerede intervalforhold, normalt accepteres af øret.

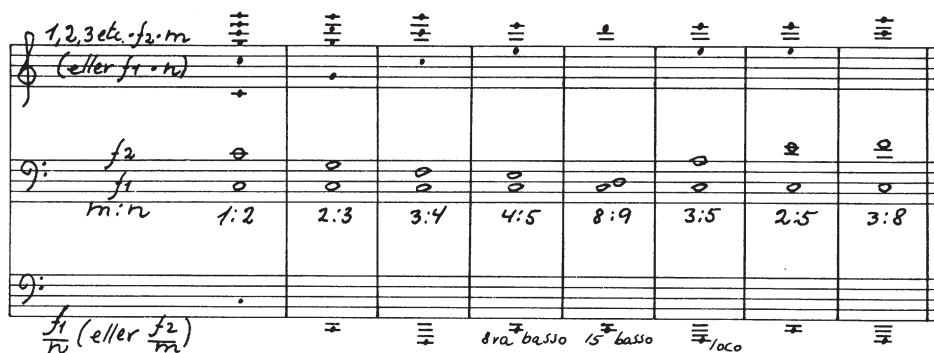


Fig. 26. Forskellige intervaller (midterste system) med sammenfaldende overtoner (øverste system) og højeste tone, hvortil begge komponenter kan være overtoner (nederste system).

I figur 26 er også indsat en tone under hvert interval, svarende til den højeste tone, som begge toner i intervallet kan være overtoner til. Intervallets sammensatte svingning har en periodetid på m/t_1 eller n/t_2 , nøjagtigt svarende til denne dybe tone.

En anden kilde til ruhed, som man normalt ikke tager med i overvejelserne, er svævninger ved forstemt konsonans mellem sinustoner. Ved specielle laboratorieforsøg kan man undertiden skelne dem fra den direkte svævning ved overtonesammenstød.

Det er indlysende, at ruheden afhænger af såvel intervallets numeriske basis som af overtoneindholdet. Den ældgamle drøm om at finde en absolut og almengyldig rangforordning af de musikalske intervallers ruhedsgrad synes dermed ikke at være mulig, medmindre man låser sig fast på en bestemt overtonekonstellation, så at sige et »normalspektrum«, og dette er næppe éntydigt definerbart. I hvor høj grad overtoneindholdet influerer på ruheden fremgår bl. a. af et forsøg, som Kameoka og Kuryiagawa har foretaget, hvor det viser sig, at med en speciel overtonekonstellation kan en kvint lyde mere ru end et tritonus-interval.¹⁸ Det er derfor helt naturligt, at der findes mindre afvigelser i de forsøg, der fra forskellig side er gjort på opstilling af en interval-rangforordning. I almindelighed er man dog enige om, at halvtoneintrinnet er det mest ru interval. Ejendommeligt nok er det ved sinustoner, f. eks. i området omkring 200 Hz, ikke halvtoneintrinnet, men heltonetrinnet, som er mest ru (se fig. 22); det er altså nogle tætliggende overtoner, som giver halvtoneintrinnet sin karakter. Som de mindst ru intervaller angives altid oktav, duodecim og kvint i den nævnte rækkefølge, primen naturligvis allerførst, hvis den er med. Derefter følger som regel kvarten, der kan være byttet om med den store sekst. I den næste gruppe kommer stor tert, lille tert, lille sekst og tritonus samt den store septim. Som de mest ru intervaller angives stor sekund, stor septim, lille sekund.¹³ Nabointervaller kan godt være byttet om i forskellige opstillinger. Intetsteds synes der at være bratte overgange, der retfærdiggør en skarp opdeling i forskellige kategorier.

I det store og hele stemmer det altså, at jo mindre tallene m og n er, des mindre ru er intervallet ($m:n$), men visse grænsetilfælde kan godt volde kvaler, selv uden spidsfindigheder i overtonesammenhængen. En lille sekst (5:8) angives oftest som mindre ru end en tritonus med talforholdet 5:7, og ikke desto mindre er både sum og produkt af m og n størst for den lille sekst. Man kan altså ikke uden videre slutte sig til, at det enkleste talforhold altid repræsenterer det mindst ru interval.

Ruheden for komplekse toner kan ikke forklares alene ud fra interaktionen mellem grundtonerne, men hvis man tager højde for komponenternes overtoneindhold, kan man finde en tilfredsstillende forklaring i alle de sammenstød, der finder sted mellem de enkelte deltoner, også grundtonerne. Dermed udelukker man ikke, at f. eks. kombinationstoner kan spille en rolle for ruheden, dersom de er til stede. Plomp og Levelt skriver:

The influence of difference tones on consonance perception also is not very probable in view of the data reproduced Moreover, experi-

ments of one of the authors on the audibility of combination tones showed that the nonlinear distortion of the hearing organ is so small that it cannot be regarded as a constitutive base for consonance.³²

De almindelige ruhedsfænomener lader sig altså forklare uden kombinations-toner.

Det er værd at bemærke, at ruheden ikke afhænger af styrkeniveauet for den givne samklang (se f. eks.¹⁵).

Ruheden for samklange mellem komplekse toner kan altså forklares ud fra den samlede virkning af alle deltonernes parvise sammenstød, således som disse finder sted, alt efter deres placering inden for de kritiske båndbredder. Dermed kan man – hørepsykologisk – forstå ørets opløsningsevne som det egentlige fænomenskabende forhold.

3. Konsonans / dissonans-begrebet og ruhedsfænomenet

Indledning

Dette hovedafsnit er et forsøg på en opklaring af, hvordan konsonans / dissonans-begrebet hænger sammen med de rent akustiske forhold.

I det første afsnit (3.1) behandles ruhedsfænomenet over for musik med bunden dissonansbehandling, dvs. musik fra perioden ca. 1400–1900. Der bliver taget stilling til lyttemåden i de hørepsykologiske forsøg og lyttemåden over for musik med bunden dissonansbehandling. Disse forskellige lyttemåder giver anledning til divergenser mellem konsonans / dissonans og ruhedsfaktoren, for hvilke der vil blive redegjort. Der er imidlertid naturligt nok en række tilfælde, hvor konsonans / dissonans-forholdene er i overensstemmelse med ruheden. Disse er beskrevet sidst i afsnittet. Forinden vil der være givet eksempler på, hvordan ruhedsfaktoren har fungeret som et virkemiddel, som komponisten har anvendt gennem den måde, instrumentation og toneleje er disponeret på. Det næste afsnit (3.2) tager stilling til, hvordan den samklangsmæssige organisme i vort århundredes musik uden bunden dissonansbehandling lader sig forstå ud fra det traditionelle konsonans / dissonans-begreb og ud fra ruhedsbegrebet. Endelig bringer det sidste afsnit (3.3.) nogle konklusioner og betragtninger omkring konsonans / dissonans-begrebets natur.

3.1. *Ruhedsfænomenet i musik med bunden dissonansbehandling*

Begrebet ruhed er som omtalt opstået i den nyere hørepsykologiske forskning for at muliggøre undersøgelser af samklangsforhold uden at være tyngt af konsonans / dissonans-begrebets musikteoretiske eller -historiske implikationer. Det er af overordentlig stor betydning, at man gør sig klart, hvilken lyttemåde der er anlagt i denne forskning.

Lytteforsøgene kan typisk være en parvis sammenligning af ruhedsgraden, eventuelt udtrykt som »ikke behagelig«, »ikke jævn«, for flere intervaller med den samme dybeste tone, altså f. eks. c'–h', der sammenlignes med c'–e'. Efter

mange parvise sammenligninger opstilles en skala, der indbefatter intervallerne med *c'* som den dybeste tone op til én eller to oktaver. Det synes at være denne metode, som f. eks. Malmberg¹³ og Kameoka og Kuiyagawa har brugt.¹⁸ Plomp og Levelt³² anvender en 7-punktsskala; dette er i princippet også en sammenlignende metode.

I andre forsøg sammenlignes ruheden ved to ens eller forskellige intervaller i forskelligt register. Dette er f. eks. tanken bag kurven i fig. 24.

Endelig kan ruhedsbedømmelsen angå samklange med forskelligt overtoneindhold. Igen er der tale om en sammenlignende undersøgelse.

Spørgsmålet er, om den anlagte lyttemåde er relevant for musikalske sammenhænge, og vi må stille det spørgsmål, hvordan vi overhovedet lytter til konsonanser og dissonanser, i første omgang i musikken fra ca. 1400–1900. Som nævnt i afsnit 1.1 er den bundne dissonansbehandling et forbløffende konstant stiltræk i denne musik. Dette indebærer, at betonedede dissonanser af en vis varighed opløses til en konsonans ved trinvis bevægelse nedad i den stemme, der har dissonansen; ved halvtone-trin dog undertiden opad. Den stemme, der dissoneres imod kan bevæge sig, men bliver oftest liggende under opløsningen. Den trinvis videreførelse gør sig i øvrigt også gældende for ubetonede dissonanser.

Hvilken musikalsk lyttemåde ligger der egentlig bag dette grundlæggende fænomen? Det er ganske givet en *sammenlignende* lyttemåde: Man sammenligner den dissonerende klang med den efterfølgende konsonerende opløsning. Forstået hørepsykologisk er det afgørende moment, at ruheden mindskes eller forsvinder ved at den ene stemme bevæger sig en stor eller lille sekund. Forstået ud fra et musikalsk oplevelsesmæssigt plan er pointen i denne sammenhæng Zarlinos ofte citerede iagttagelse: »Vi erfarer dagligt, at dersom øret i nogen tid har været såret af en dissonans, bliver den efterfølgende konsonans så meget mere sødmefyldt og behagelig«. (*op. cit.*, p. 53–54).

Man lytter altså sammenlignende til konsonanser og dissonanser, men det er meget vigtigt at fastslå, at man ikke lytter sammenlignende på alle de planer, som det var tilfældet i de hørepsykologiske forsøg. For det første sammenligner man kun intervaller eller akkorder i samme toneleje – opløsningen flyttes jo ikke til et andet toneleje. For det andet lytter man til intervaller eller akkorder i samme klangfarve. Opløsningen bringes (som regel da) i den samme instrumentation som dissonansen.

Disse forhold indebærer nogle divergenser mellem ruhedsfaktoren og konsonans / dissonans i musik med bunden dissonansbehandling:

1. Med hensyn til *det registermæssige* fremgår det eksempelvis af fig. 24, at en stor tert høres som mere ru i et dybere register. Dette har man noteret sig som en særlig klanglig virkning, der kan bruges musikalsk – tænk f. eks. på de såkaldte Beethoven-tertsen. Imidlertid ændrer tonelejet intet ved klassificeringen af et interval som enten konsonans eller dissonans; i en musikalsk sammenhæng er tertsen selv i nok så dybt leje et interval, der ikke kræver opløsning.

2. Selve *klangfarven* kan give en akkord en større eller mindre grad af ruhed; et ekstremt tilfælde, hvor en kvint lød mere ru end en tritonus er beskrevet i afsnit 2.8. Klassificeringen af et interval eller en akkord som konsonerende eller dissonerende er derimod komplet uafhængigt af klangfarven. Selv den mest snerrende udgave af en mol-treklang spillet af oboer og fagotter er stadig en musikalsk gestalt, der ikke kræver opløsning. Et stort overtoneindhold kan også gøre *en enkelt tone* meget snerrende, ru. Dette har naturligvis intet at gøre med dissonans i musikteoretisk betydning.

Når disse forhold med toneleje og klangfarve tages i betragtning, bliver det klart, at ruhed på ingen måde er oversætteligt med tonal dissonans, således som Plomp hævder (¹⁴, p. 69). I de forsøg, hvor personerne skulle bedømme »tonal dissonans« var proceduren den sædvanlige sammenlignende uden for en musikalsk kontekst, og det er derfor ikke overraskende, at resultaterne stemte overens med bedømmelsen »mest ru«.

Man kunne ud af det foregående få det indtryk, at musikken med bunden dissonansbehandling var disponeret i toneleje og instrumentation helt uden hensyn til, hvordan dette influerer på klangen. Dette er naturligvis ikke tilfældet, og som musiker har man ofte på fornemmelsen, at udlægningen af akkorder bevidst er disponeret således, at der er opnået en smuk klanglig egalitet. At dette kan være tilfældet, er der leveret et bevis for ved de statistiske analyser af henholdsvis J. S. Bachs *Triosonate nr. 3, c-mol* for orgel, 4. sats og A. Dvořáks »Romanze« fra *Strygekvartet, Es-dur, op. 51*, som Plomp og Levelt har foretaget.³² Det viser sig, at der tilsyneladende er disponeret således, at den ruhed, som overtonesammenstødene giver anledning til, er holdt inden for visse grænser i nøje overensstemmelse med de kritiske båndbredder. Undersøgelsen bekræfter altså, at der kan være tilstræbt en bestemt klanglig egalitet. I andre tilfælde vil man måske kunne finde direkte brud på den klanglige egalitet, men i alle tilfælde er der tale om en forholden sig til selve klangens ruhed.

Det er ovenfor godtgjort, at ruhedsgraden på grund af sin afhængighed af toneleje og klangfarve ikke kan sammenholdes direkte med konsonans og dissonans. Man kan så spørge, om den gængse klassificering konsonerende / dissonerende af intervaller og akkorder i *samme toneleje og med samme klangfarve* altid vil være i overensstemmelse med den faktiske ruhedsgrad. Sagt på en anden måde: Om en dissonans under disse forhold altid er mere ru end en konsonans? Spørgsmålet kan normalt besvares bekræftende – klassificeringen af konsonanser og dissonanser er jo ikke grebet ud af luften – men der findes dog undtagelser. En af disse undtagelser er kvartintervallet, der er klassificeret som enten fuldkommen konsonans eller – i det tilfælde, at der dannes kvartinterval med bastonen – som dissonans. Dette gælder både for kvarten og kvartens udvidelse med én oktav (til undecim) eller med to okta-ver.

Både Helmholtz¹¹, Malmberg¹³, Plomp og Levelt³², Kameoka og Kuryiagawa¹⁸ bedømmer en kvart som mindre ru end en tert. Man kan derfor undre sig

over, at det er korrekt stemmeføringspraksis at opløse kvarten til en terts som vist:



At vi hører dette som en naturlig vending og virkelig opfatter tertsen som opløsningen, kan altså næppe skyldes vores umiddelbare sansning af samklangene, men må tilskrives vores musikalske skoling! Undervisere i skriftlige satsdiscipliner vil også kende vanskeligheden ved at få indlært denne høremåde.

I første hovedafsnit blev en del af den musikteoretiske diskussion omkring kvarten ridset op, og kvartens underlige dobbelttydige rolle blev omtalt. Kan man finde en forklaring på den dobbelte klassificering, og kan man afgøre, hvilke teoretikere der har ret?

Man kan foretage et ganske enkelt lytte-eksperiment, f. eks. på klaver, som skitseret:



Lytter man ind til den faktiske ruhed, vil man nok opfatte kvarten som mindre ru end tertsen, men undecimen som *mere* ru end decimen. Ihvert fald opfatter f. eks. v. Holmholtz¹¹ forholdet således. Forklaringen ligger naturligt nok i sammenstødet mellem f' og den tredje deltone g' , som tegnet ind på figuren. (Den sammensatte svingnings periodetid for undecimen er i øvrigt også længere end for både decim og duodecim – smlgn. fig. 26). Det er altså en fejlagtig slutning, at man altid kan udvide et interval med én eller to oktaver uden at der sker nogen ændring af intervallets karakter. Vi må således forsøge at afgøre den mere end 2000-årige strid og indrømme pythagoræerne, at undecimen ikke bør tælles til konsonanserne ligesom kvarten. Ptolemæus har således ikke ret i, at man kan udvide et hvilket som helst interval med en oktav uden at ændre klangkarakteren. Boethius gør derimod ret i at trække undecimen væk fra klasserne af konsonanser. Imidlertid satte denne disput senere teoretikere og musikere i tvivl, så de ikke brugte kvarten med fuld frihed. Dermed blev en musikalsk praksis knæsat, på trods af Zarlinos opfattelse, og den musikalske skoling gennem århundreder har så lært os at abstrahere fra de faktiske ruhedsforhold ved kvart og terts!

Der findes sikkert også andre særtilfælde, f. eks. ved særlige overtonekonstellationer, hvor man genkender de samklangsmæssige gestalter og erkender den musikalske struktur mere i kraft af den musikalske skoling end ved den umiddelbare sansning, men normalt må man dog antage, at klassificeringen af intervaller og akkorder som enten konsonante eller dissonante er i overensstemmelse med den faktiske ruhedsgrad, forudsat ensartet klangfarve og toneleje. De hørefysiologiske forhold, som betinger ruhedsfænomener, er dermed også relevante for forståelsen af konsonans og dissonans. De konsekvenser i vores forståelse af konsonans og dissonans, som dette har, vil blive taget op i afsnit 3.3.

3.2. *Ruhedsfænomenet i musik med fri dissonansbehandling (fra ca. 1900)*

Debussy's musik har som bekendt været banebrydende for vort århundredes musik. Den stilistiske fornyelse er betinget af, at der lyttes til *klangen i sig selv*; konsekvenserne heraf var overvældende: Dissonanserne krævedes ikke længere opløst og tonaliteten svækkedes.

Den isolerede klang uden hensyn til stemmeføringsmæssig forberedelse og videreførelse er netop det, som ruhedsbegrebet opererer med. Den afgørende pointe i en dissonerende akkord ligger nu ikke længere i, at man forventer en bestemt stemmeføringsmæssig videreførelse, men primært i akkordens egen-valeur, således som denne er formidlet, ikke blot ved selve sammensætningen af toner, men også ved toneleje og instrumentation. Ruheden bliver således her et særdeles adækvat begreb for den teoretiske forståelse af den samklangsmæssige organisme.

Selv om den musikalske praksis er ændret radikalt inden for de sidste 80 år, holder vi alligevel fast ved den traditionelle klassificering af samklangene i fuldkomne konsonanser, ufuldkomne konsonanser og dissonanser. De beskrivelser og analyser af den ny musik, som man kan gøre ud fra dette, bliver temmelig intetsigende. Som regel bliver det blot slået fast, at der er »fri dissonansbehandling«, og at nogle bestemte intervaller er særligt fremherskende. Dermed får man egentlig ikke særlig meget information om, hvordan det samklangsmæssige fungerer. Over for bruitistisk orienteret musik, der er baseret på clusters og klangfelter, bliver det endda komplet meningsløst at anlægge en analytisk synsvinkel ud fra konsonans og dissonans. Derimod kunne det i høj grad være interessant f. eks. at få undersøgt skiftende klangfelters ruhedsgrad.

Det kan altså – egentlig ganske overraskende – konkluderes, at *konsonans / dissonans-begrebet hænger uløseligt sammen med den bundne dissonansbehandling*.

Vor tids musik kræver en musikteoretisk nytænkning, et nyt begrebsapparat for det samklangsmæssige ud fra musikens egne præmisser. Måske kan ruhedsbegrebet bane vej for en sådan nytænkning – i den ånd, som Schönberg⁵ forestillede sig det.

3.3. *Om konsonans / dissonans-begrebets natur*

Til sidst nogle sammenfattende betragtninger omkring konsonans / dissonans-begrebets natur.

Konsonans og dissonans er begreber, som er musikhistorisk, dvs. kulturelt betingede. Der har til forskellige tider været forskellige definitioner på, hvilke samklange der var det ene og det andet; inden for de sidste 600 år har definitionerne dog ligget fast i den vestlige verdens musikteori.

Konsonans / dissonans-begrebet hører rent musikhistorisk ganske nøje sammen med den bundne dissonansbehandling (afsnit 3.1 og 3.2), men er ikke desto mindre udsprunget af et rent sensorisk fænomen – her i artiklen omtalt som ruhed.

Konsonans/dissonans-begrebets nøje sammenhæng med den bundne dissonansbehandling gør det til et ret uhåndterligt analyse-værktøj over for vort århundredes musik med fri dissonansbehandling, hvor det afgørende moment ikke er en forventet stemmeføringsmæssig videreførelse af en akkord, men først og fremmest akkordens klanglige egenskaber, således som disse er formidlet, ikke blot gennem tonekonstellation, men også gennem toneleje og klangfarve. Ruheden – altså den »sensoriske dissonans« – synes at være et langt mere adækvat begreb i forståelsen af de samklangsmæssige organismer i vort århundredes musik (afsnit 3.2).

Den skarpe kategorisering af konsonanser og dissonanser genfindes ikke i det sensoriske: Her er der afgjort tale om glidende overgange, forskellige grader af ruhed. Udviklingen frem mod den lyttemåde, der ligger til grund for vort århundredes musik, er da også netop foregået ved, at stilen i forrige århundrede blev mere og mere spændt i det harmoniske med flere og flere dissonerende akkorder, så en i sig selv dissonerende akkord til sidst kunne opfattes som konsonans, fordi den foranstående akkord havde en endnu større ruhedsgrad. På den måde skred fundamentet under den skarpe klassificering og dermed til sidst også under den bundne dissonansbehandling – en 500-årig musikalsk praksis.

Den høremåde, der ligger til grund for den bundne dissonansbehandling, sammenligner to akkorder i samme klangfarve og toneleje, og netop denne høremåde ligger implicit i den traditionelle klassificering af konsonanser og dissonanser. Under disse forhold – ensartet klangfarve og toneleje – ækvivalerer konsonans/dissonans-begrebet i de allerfleste tilfælde med den sensoriske konsonans / dissonans (ruheden), og de forhold, som betinger ruheden, betinger også konsonans og dissonans i en musikalsk sammenhæng.

Konsonans og dissonans mellem komplekse toner er altså afhængig af:

1. Ruheden for de komplekse toners grundtoner, der afhænger af, hvordan disse er placerede inden for de kritiske båndbredder.
2. Ruheden for de overtonepar, som ligger inden for samme kritiske båndbredde uden at være sammenfaldende (afsnit 2.4, 2.8).
3. Den ruhed, der skyldes svævninger mellem næsten sammenfaldende overtoner.

Kombinationstoner kan, dersom de er til stede, bidrage til ruheden, men de synes ikke at spille nogen afgørende rolle (afsnit 2.5, 2.8).

Den ruhed, der fremkommer ved forstemt konsonans mellem sinustoner (afsnit 2.6) *kan* eventuelt bidrage til ruheden.

De enkle talforhold i interval-konstellationen favoriserer *mange* sammenfaldende overtonepar og dermed få egentlig ruhedsgivende overtonesammenstød; dog synes det vanskeligt at opstille en enkel sammenhæng mellem talforhold og ruhedsgrad, bl. a. fordi det kræver definition af et »normalspektrum«.

Residual-effekten spiller muligvis en vis rolle i den perceptive gestaltdannelse omkring akkordsammenhænge, men disse forhold er endnu ikke undersøgt.

Hovedårsagerne til ruhed er givet med de ovenstående punkter 1–3, som alle lader sig relatere til ørets opløsningsevne. *Ørets ikke fuldstændige opløsningsevne er altså den egentlige hørepsykologiske forudsætning for konsonans og dissonans.* Hvis vores hørelse havde været indrettet således, at et signal altid kunne opløses 100 % i sine bestanddele, ville vi slet ikke opfatte dissonans. Vi ville høre enkelttonerne nøjagtigt som de lyder isoleret og ikke dette »noget mere«, som er samspillet mellem dem, ruheden. Og dersom vi ikke opfattede dissonans, ville vi heller ikke opfatte konsonans, for konsonans og dissonans hører naturligvis gensidigt sammen.

Summary

The more than 2000-year-old fascination with the mathematical aspects of music is the starting point. The preoccupation with the numeric relations of the intervals seems to have been nourished by the idea that it will be possible to get beyond the surface onto »the thing in itself«. In section 1.1 the theoretical and historical concepts of consonance and dissonance are described. The acceptance of thirds and sixths in the music of the 14th century leads to the standard grouping of the musical intervals into three categories: perfect consonances, imperfect consonances, and dissonances. Around 1400 the strict dissonance treatment is established, i.e.: the demand that a dissonance on rhythmically strong notes is tied over from the previous chord and resolved by step, usually downwards. This stylistic feature remains amazingly constant through the history of Western music; until c. 1900, in fact, when the dissonances are emancipated. In our century the decisive aspect of a chord is not that it is joined with the neighbouring chords by a specific voice leading technique, but rather its purely sonic appearance. It is amazing that this radical change of style has not led to a corresponding revolution of consonance and dissonance on the theoretical level, a new concept of harmony. A survey of the Renaissance music theorist Zarlino's account of the numeric relations and the musical character of the intervals concludes this section.

The acoustic and psychological concept of consonance and dissonance is surveyed in section 1.2: The discovery of oscillations in the Renaissance; later the

discovery of the partial tone series; through the numerous theories of harmony in the 19th century; to the psycho-acoustical research of the last 20 years, in which the concept »roughness« of perceived dissonance is the keyword.

The acoustical prerequisites for consonance and dissonance are discussed in the 2nd section: First a number of elementary acoustical phenomena (2.1), secondly the auditory functions including the transformation of sound energy into nerve impulses as uncovered by the latest audio-physiological research (2.2). These relations furnish us with a new way of understanding the resolving power of the ear, i. e. its capability of discriminating several simultaneous stimuli (2.3). The ear's frequency analysis of two simultaneous sine waves can, according to the circumstances result in complete resolution, no resolution, or partial resolution. The critical bandwidths (2.4) are audio-psychologically defined frequency bands describing the resolving power of the ear in quantitative terms. They are of great significance in understanding the neural coding and thus the perception of sound. Combination tones including difference tones (2.5) are perceived tones not physically present in the original signal. Their phenomenology is well-known but their origin is not fully explained as yet. Beats of mistuned consonances for sinuoidal tones (2.6) have earlier been explained by the presence of aural harmonics. Today there is an inclination to explain them by the ear's sensibility to variations in the cyclic waveform. They are an example of how the resolving power of the ear works on compound waveforms.

The residual pitch (2.7) is, in short, the phenomenon that the fundamental of a harmonic spectrum is perceived even if it is not physically present. It has been explained both with reference to the resolved tones of the spectrum and by the unresolved part of it. The residual mechanism may have something to do with the gestalt-formation of the perception of chords.

Roughness (2.8) is a concept from the newer psycho-acoustical research established in order to be able to describe the perception of simultaneous tones without being burdened by the theoretical and historical implications of musical consonance and dissonance. The roughness of two simultaneously sounding simple tones is closely related to the critical bandwidth. There is maximum roughness at c. $1/4$ of the critical bandwidth. These matters are investigated in great detail by Plomp and others, while Kameoka and Kuriyagawa have established a well-defined scale for roughness with general perception-theoretical considerations as the point of departure. This has enabled us to mathematically calculate the roughness of a given sound. These calculations are expanded to include complex tones with given partials in different registres.

It turns out that the roughness of several simultaneous complex tones cannot be explained by the interaction of their fundamentals alone. One must calculate the joint effect of all the partials grouped in pairs as they clash within the individual critical bandwidths. It is thus possible to understand the resolving power of the ear as the audio-psychological prerequisite of roughness. Combination tones may add to the roughness but they cannot be regarded as a determining factor.

The third section is concerned with the relation between the consonance/dissonance concept on the one hand and purely acoustical phenomena on the other. First the concept of roughness is related to music with strict dissonance treatment (3.1). The empirical investigations of roughness based on comparative listening: Different intervals in different registres and with different timbres are compared. In music with strict dissonance treatment the way of listening is also comparative: The dissonance is compared with the subsequent consonance. But as the resolution of the dissonance is stepwise without change in »instrumentation«, one does not compare intervals and chords in different registres and with different timbres. As regards register and timbre roughness then is another thing than consonance / dissonance in music with strict dissonance treatment. The two phenomena do *not* aequivalate such as most authors of modern acoustic literature have it.

Register and timbre will often endow a musical gestalt with a high degree of roughness without making it a musical dissonance, i. e. without necessitating dissonance treatment. It would, however, be wrong to believe that register and instrumentation in music with strict dissonance treatment are arranged without regard to their influence on the sonic appearance of the music. A statistical investigation of two musical works has uncovered that the partial tone clashes are kept within limits which agree nicely with the critical bandwidths. Within a given register and with a given timbre there will normally be a good correlation between musical consonance / dissonance classification and the psycho-acoustical roughness with, however, certain exceptions, e. g. the fourth. In music after 1900 with free dissonance treatment (3.2) the musical point of a chord is not the expected resolution of its formal dissonances but primarily its »sonic appearance«, in which not only its tone combination but also register and instrumentation play an important part. Roughness, which in fact describes the individual harmony without regard to the surrounding voice leading, is here a very adequate concept for a theoretical description of the sonic organism of music and it might be a basis for a new musical concept of harmony on the premises of this music. Descriptions and analyses of new music based on the traditional concept of consonance and dissonance are normally so poor that it seems clear that this concept is outdated. One may safely conclude that the consonance / dissonance concept is inseparable from the rules of dissonance treatment. In 3.3 it is concluded that the consonance / dissonance concept is a cultural phenomenon, that the sharp distinction between consonance and dissonance is not reflected in the sensory perception, but if uniform register and timbre are presupposed, consonance / dissonance normally aequivalate with roughness. Under this aequivalence the physical and physiological conditions for consonance and dissonance are naturally the same as for roughness. *The deficient resolving power of the ear may thus be regarded as the fundamental generator of the phenomena.*

It is (by the way) difficult to establish a simple correlation between the musical intervals as described by their simple frequency relations and the degree of roughness because, a. o. things, it necessitates the definition of a »normal«

spectrum. If the resolving power of the ear was perfect, neither consonance nor dissonance would exist. The two concepts are interdependent.

Noter

1. H. C. Andersen: *En Digters Bazar*. Kjøbenhavn 1842. (Min kursivering).
2. Se f. eks. Finn Benested: *Musikk og tanke*. Oslo 1976, s. 13f.
3. A. Schopenhauer: *Die Welt als Wille und Vorstellung*. Frankfurt am Main 1859 (Zürich 1977). Kap. 39: »Zur Metaphysik der Musik«.
4. M. F. Bukofzer: »John Dunstable: a Quincentenary Report«. *The Musical Quarterly* xl, 1954, p. 29.
5. A. Schönberg: *Harmonielehre*, Wien 1911, rev. 1922.
6. Gioseffo Zarlino: *Le Istitutioni harmoniche*. Venezia 1558, 3. del oversat af G. A. Marco og C. V. Palisca, London, 1968.
7. Zarlino (*op. cit.*) refererer til Ptolemæus: *Harmonika*, 1.6.
8. Boethius: *De institutione musica*, V, 9.
9. Leibniz i et brev til Christoph Goldbach (1712): »Musiken er den skjulte aritmetiske øvelse for sjælens ubevidste tællen«. (Ovs. efter C. Kortholt (ed.): *Epistolae ad diversos*, Leipzig, 1734).
10. Leonhard Euler: *Tentamen novae theoriae musicae, ex certissimis harmoniae principiiis dilucidatae expositae*. St. Petersborg, 1739.
11. H. v. Helmholtz: *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Braunschweig, 1863.
12. F. C. Stumpf: *Tonpsychologie*. Leipzig, 1883–90, rev. ed. 1965.
13. C. F. Malmberg: »The perception of consonance and dissonance«. *Psychological Monographs* 25, 1918, p. 93ff.
14. R. Plomp: *Aspects of Tone Sensation*. London 1976.
15. E. Terhardt: »On the perception of periodic sound fluctuations (roughness)«. *Acustica* 30, 1974, pp. 201–213.
16. E. Terhardt: »Pitch, consonance and harmony«. *J. Acoust. Soc. Amer.* 55, 1974, pp. 1061–1069.
17. E. Terhardt: »Ein psychoakustisch begründetes Konzept der Musikalischen Konsonans«. *Acustica* 36, 1974, pp. 201–213.
18. A. Kameoka & M. Kuriyagawa: Consonance Theory Part I: »Consonance of Dyads«. Part II: »Consonance of complex Tones and its Calculation Method«. *J. Acoust. Soc. Amer.* 45, 1969, pp. 1451–1469.
19. N. Y.-S. Kiang: »A survey of recent developments in the study of auditory physiology«. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 77, 1968, pp. 656–675.
20. J. F. Brugge, D. J. Anderson, J. E. Hind, J. E. Rose: »Time structure of discharges in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey in response to complex periodic sounds«. *Journal of Neurophysiology* 32, 1969, pp. 386–401.
21. J. E. Rose: »Discharges of single fibers in the mammalian auditory nerve«. Plomp & Smoorenburg (eds.): *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing*. Leiden 1970.
22. E. Zwicker: »Masking period patterns of harmonic complex tones«. *J. Acoust. Soc. Amer.* 60, 1976, p. 429ff.
23. G. F. Smoorenburg, M. M. Gibson, L. M. Kitzes, J. E. Rose, J. E. Hind: »Correlates on combination tones observed in the response of neurons in the anteroventral cochlear nucleus of the cat«. *J. Acoust. Soc. Amer.* 59, 1976, pp. 945–962.
24. E. de Boer & H. R. de Jongh: »On cochlear encoding: Potentialities and limitations of the reverse-correlation technique«. *J. Acoust. Soc. Amer.* 63, 1978, p. 115ff.

25. G. A. Sorge: *Vorgemach der musikalischen Composition*. Lobenstein, 1745–47.
26. J. B. Romieu (1723–1766) offentliggjorde sin opdagelse af differenster i 1751. Giuseppe Tartini (1692–1770), der tilsyneladende ikke var vidende herom, offentliggjorde sin opdagelse af det samme fænomen i 1754.
27. R. Plomp: »Beats of mistuned consonances«. *J. Acoust. Soc. Amer.* 42, 1967, pp. 462–473. (Jfr. også¹⁴, kap. 3).
28. D. A. Nelson & R. C. Bilger: »Pure-tone octave maskings in normal-hearing listeners«. *Journal of Speech and Hearing Research* 17, 1974, pp. 223–251.
29. H. Fletcher: »The physical criterion for determining the pitch of a musical tone«. *Phys. Rev.* 23, 1924, pp. 427–437.
30. J. F. Schouten: 1. »The residue, a new component in subjective sound analysis«. 2. »The residue and the mechanism of hearing«. *Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch.* 43, 1940, pp. 356–365 og 991–999.
31. J. C. R. Licklider: »»Periodicity« pitch and »place« pitch. *J. Acoust. Soc. Amer.* 26, 1954, p. 945ff.
32. R. Plomp and W. J. M. Levelt: »Tonal consonance and critical bandwidth«. *J. Acoust. Soc. Amer.* 38, 1965, pp. 548–560.