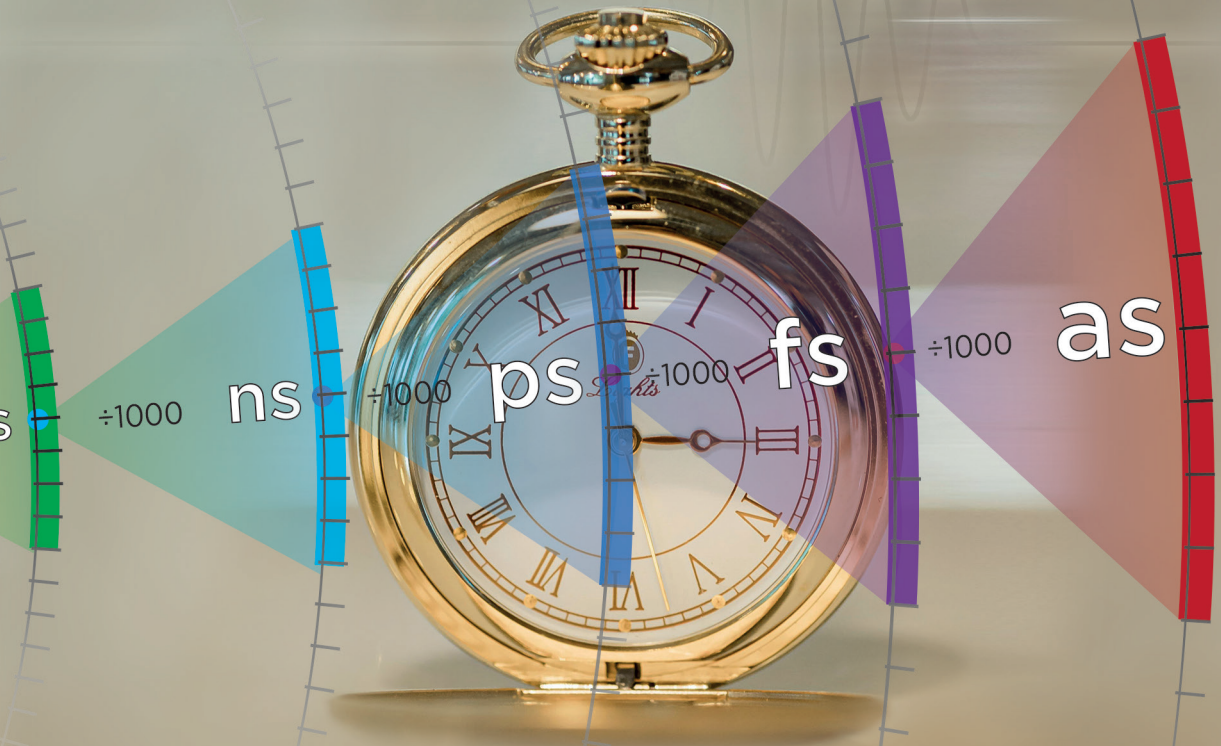


KOSMOS

attofysik

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2025



OPERANS FYSIK – ÖVERTONER I LJUD OCH LJUS

© JOHAN MAURITSSON OCH HEDVIG JALHED



Artikeln publiceras under Creative Commons-lisensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning gäller samma upphovsrättsliga regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET

För otränade öron och ögon är det inte lätt att se vad operasång och attofysik har med varandra att göra. I det här bidraget visar dock Johan Mauritsson och Hedvig Jalhed att det finns påtagliga paralleller. Artikeln är en frukt av ett populärvetenskapligt projekt där artikelförfattarna använder just dessa beröringspunkter för att sprida såväl visdom som skönhet för både öron och ögon.



Johan Mauritsson

är professor i atomfysik vid Lunds universitet. Hans forskning fokuserar på att generera, mäta och använda attosekundpulser. Attosekundpulserna kan skapas både via hög övertongenerering, men på senare tid även vid frielektronlaser. Han är aktiv i svenska fysikersamfundet och sitter med i styrelsen för undervisningssektionen.

Hedvig Jalhed

är lektor i konstnärlig forskning i musik med inriktning musikdramatik vid Lunds universitet. Hon är också lektor i kammarmusik och kammaropera vid Mälardalens universitet. Hennes forskning handlar framför allt om immersivitet och interaktivitet i opera. Hon samverkar gärna med vetenskapliga forskare för att sammanföra konst och vetenskap på olika sätt. I grunden är hon operasångare och det är hennes sopranröst som studeras och analyseras i projektet Operans fysik.

*Bilden: Auditoriet/
salongen på
La Fenice-
operan i Venedig.
Se även sid 79.*

Operans fysik – övertoner i Ljud och Ljus

Ouvertyr

Publiken sitter förväntansfull i operahuset, orkestern är redo och äntligen går ridån upp. På scenen står en ensam sopran och ljudet från hennes röst når över orkesterdikedet, ut i varje del av den stora salongen. Med rösten som medel och flera års hård, fokuserad träning trollbinder hon hela publiken. Det är i första hand operasångarens övertonrika ljudalstring, snarare än ljudvolymen mätt i decibel, som bidrar till röstens effektivitet i förhållande till andra ljudkällor. Det är det rika *övertonsspektrumet* i ett frekvensomfång vilket inte konkurrerar med orkesterinstrumenten som gör det möjligt för människan att höras över och genom ackompanjemanget och ut i salongen.

Övertoner, men nu skapade av ljus istället för ljud, är ett centralt koncept också för Nobelpriset i fysik 2023. De tre pristagarna belönades ”*för experimentella metoder som genererar attosekundpulser av ljus för studier av elektrondynamik i materia*”. Dessa metoder handlar om hur övertoner skapas när starka laserpulser växelverkar med atomer, hur dessa övertoner synkroniseras för att producera attosekundpulser och hur man sedan kan mäta dessa pulser.

Operasång och attofysik är tillsynes vitt åtskilda, men ämnesområdena visar sig ha en hel del gemensamt när man tittar närmare på detaljerna. Det är också ett vanligt pedagogiskt trick att använda musik och ljud för att presentera attofysik för en bredare allmänhet.

Årets Kosmos handlar om attofysik och attosekundpulser. Dessa pulser skapades först med hjälp av höga övertoner av laser-

pulser¹. I den här artikeln beskriver vi — en fysiker och en musiker — hur opera och musik kan användas för att skapa intresse för fysik i allmänhet och attofysik i synnerhet. Vilka likheter och olikheter finns det för övertoner skapade av ljud och ljus? Vi försöker att pedagogiskt beskriva hur övertonerna genereras i båda fallen och även hur man sedan kan kontrollera och variera dem. Vi lyfter fram likheter, men också olikheter som annars kan vara mer förvirrande än informativa. Det är övertonerna som gör att vi hör skillnad på en sopran och en tenor, även när de sjunger samma ton. Det är även hur dessa övertoner formas som gör att vi uppfattar olika vokalljud.

Exempel från operavärlden

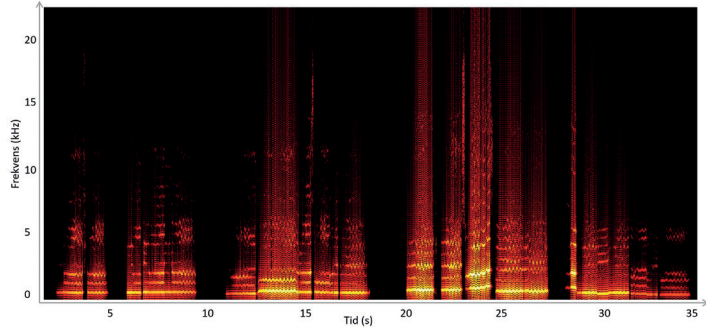
Det händer något spännande i mötet mellan människor, i deras möte med musik och i mötet mellan olika vetenskaper. Konst och musik kan inte bara både stimulera och lugna sinnena, de kan också användas i pedagogiskt syfte för att presentera olika fenomen och fånga intresset hos nya grupper. I projektet *operans fysik* söker vi likheter och analogier som kan hjälpa fler att förstå vad attofysik handlar om och ge ny inspiration.

Vi börjar med att titta närmare på övertoner i ljud och deras funktion i operakonsten, för att sedan flytta fokus till övertoner i ljus. Arian *Lascia ch'io pianga* är en gripande sopranaria ur Georg Friedrich Händels opera *Rinaldo* från 1711. Den framförs av karaktären Almirena, som har blivit bortrövad av en ond trollkvinna och hålls fången. I sin ensamhet och förtvivlan sjunger hon en bön om frihet och medlidande. Texten uttrycker hennes sorg över sitt grymma öde och hennes längtan efter att återfå sin frihet: ”*Lascia ch'io pianga mia cruda sorte, e che sospiri la liberta*” — ”Låt mig begråta mitt grymma öde, och sucka efter friheten”. Med sin enkla men hjärtskärande melodi har arian blivit en symbol för mänskligt lidande och hopp. Arian är en av operarepertoarens mest välkända och förekommer i många populärkulturella sammanhang. Den första frasen innehåller också en sekvens med flera olika vokalljud (fonetiskt a-i-u-o-e) i ett register² där de tydligt kan särskiljas, vilket har en poäng i vårt projekt.

¹Senare även vid frielektronlasrar.

²En röst kan uppfattas ha olika register i vilka särskilda omfång av fonationsfrekvenser framställs på liknande sätt och upplevs ha likartade tonkvaliteter. Till exempel kan så kallad bröstklang skiljas från huvudklang genom den tonfärg som uppstår i de olika registren.

En frekvensanalys (se figur 1) av arian visar på en både intrikat och varierad struktur med grundtoner och olika övertoner, vibrato och höjning. Vi kommer att bryta ner de olika delarna, beskriva hur de uppkommer och vilka likheter det finns med attosekundpulser skapade av övertoner — eller är det övertonerna som skapas av attosekundpulserna?



Figur 1: Bilden visar en frekvensanalys av en inspelning där kapitelförfattaren Hedvig Jalhed sjunger sopranstämman i arian ”Lascia ch’io pianga” av Händel. Det är Hedvig Jalhed som sjunger i samtliga exempel i den här texten. Musiken går att lyssna på om man följer QR-koden som finns i slutet av artikeln, efter ”Vidare läsning”.

Arian är kanske framförallt känd för sina pauser som tydligt framträder i frekvensanalysen. Pauserna är inte bara musikaliska andningsrum — de är emotionella laddningar som förstärker arians innersta budskap. Vi kommer framgent att framförallt fokusera på toner och övertoner där vi hittar likheter med attofysiken.

Operan, en konstform sprungen ur vetenskapen

För att förstå operans relation till samhället i stort, och olika vetenskaper i synnerhet, behöver vi betrakta konstformen i sitt historiska sammanhang. Operan är inte en konstform som vuxit fram organiskt, utan en uppfinning från renässansen, direkt sprungen ur intellektuell samverkan mellan tidens vetenskapsmän och konstnärer. Ännu under medeltiden räknades musik jämte aritmetik, geometri och astronomi till de fyra matematiska konsterna som lärdes ut i det som kallades *quadrivium*. Under renässansen kom matematiken också att bli alltmer central inom arkitektur och bildkonst, inte minst genom Fibonaccis talserie och ett nytt intresse för proportionerna i *det gyllene snittet* — något som bland annat

kan ses i Leonardo da Vincis arbete. Också utforskandet av människans anatomi finns i renässanskonsten. Att vi idag har en skarp åtskillnad mellan vetenskap och konst beror på utvecklingen av begreppet vetenskap under 1800-talet, då man började särskilja den specialiserade forskaren i studiet av naturen. Vi kan dock fortfarande tala om en renässansmänniska som en person som kan kombinera kunskaper från flera områden och röra sig fritt mellan konst och vetenskap. Operan uppstod precis i denna mylla.

Idén om en ny slags musikdramatik som kunde återuppväcka antikens ideal och idévärld uppkom i slutet av 1500-talet i det sällskap som kom att kallas den florentinska cameratan³, där bland andra Vincenzo Galilei, far till Galileo Galilei ingick. Antika tänkare hamnade i fokus och det fanns bland annat en kritisk diskussion om musikteori som rörde den rådande pytagoreiska⁴ stämningens tillkortakommanden i förhållande till det mänskliga sinnet (mer om fördelen med olika tonskalor senare). Naturligtvis fanns det redan före renässansen konstnärliga uttryck som kombinerade text, musik och skådespeleri. Det som var nytt med operan var *monodin*, en sångstil med en ensam, ofta utsmyckad, melodilinje till instrumentalt ackompanjement, som stod i kontrast till kontrapunktisk⁵ komposition. Att sätta en solist i centrum och låta den enskilde uttrycka sig personligen som fiktiv — ofta mytologisk — karaktär med klingande ord kan kopplas direkt till humanismen och individualismen som växte fram som idétraditioner under denna tid. Den första operan, i vilken cameratans teorier omsattes i handling och gestalt, blev *Dafne* av Jacopo Peri, men inga dokument från detta verk finns bevarade. Bara ett par år senare, år 1600, kom emellertid Peris andra opera, *Euridice*, och den uppförs fortfarande då och då.

Operasångare får sina roller till stor del efter röstens karaktär. Oavsett vilken sorts sångare som står i centrum i en opera, är fokuset alltid en individ — eller en hjälte, som vi gärna säger i

³*Camerata Fiorentina — eller Camerata de' Bardi som den också kallades efter sin beskyddare greve Giovanni de' Bardi — var ett intellektuellt sällskap i Florens under renässansen. Sällskapets medlemmar bestod av humanister, poeter och musiker och kom från det att sällskapet bildades 1573 att inrikta sig på framför allt musikdramatikens utveckling i sin tid.*

⁴*Pytagoreisk stämning bygger på hela kvinter. Systemet brukar tillerkännas Pythagoras.*

⁵*Kontrapunkt eller "not-mot-not" är en teknik som används i flerstämmig komposition med självständiga melodilinjor som flätas samman till en helhet.*

opera. De flesta operor bär sina titlar efter sina huvudkaraktärer (Carmen är ett bra exempel) och att vi talar om operahjältar och operahjältinnor är direkt kopplat till operans humanistiska rötter: I opera utsätts individen för prövningar och operahjältarna går sin egen väg. Röstens bärighet symboliserar det okuvliga i den enskilda människan och det har noterats att medan gudar ofta ingriper i handlingen i tidiga operor, lämnas människorna mer och mer åt sitt öde allteftersom religionens roll förändras i den moderna världen. Självklart är detta en generell iakttagelse och det finns stor variation i vad operor handlar om, men detta är ett exempel på hur konsten utvecklas i relation till det omgivande samhället.

Teknologiska utvecklingar har medfört förändringar över tid inom operan. Nya musikinstrument har tillkommit och orkestrarna har vuxit. Varje tid har placerat sångsolisten i ett delvis nytt ljudlandskap och idag möter den mänskliga stämman elektroniken. Nya operahjältar stöter på nya utmaningar samtidigt som nya musikedramatiska former avknoppas i och med teknikutvecklingen, som under 1900-talet möjliggjorde den mikrofonförstärkta, filtrerade, processade och inspelade rösten. Med mikrofonerna kom musikalerna och den simultant dansande och sjungande sångaren på de stora scenerna.

Operasångarens konst är i grunden alltid kroppsekonomisk, eftersom den konstant handlar om att balansera energiomvandlingen för rörelse, ljud och memorering på mest effektiva vis. Operasångaren lär in timmar av musik och text som gestaltas dramatiskt på scen och måste på egen hand tränga igenom och fungera i samklang med det omgivande sammanhanget och ljudlandskapet. Därför kan operasång inte likställas med sång på konsert eller sång i studio som sker utan rörlig gestaltning och med möjligt stöd av noter och manus. Den sångteknik som utvecklats i relation till både operans kontext och grundidé om hjältesolisten, samt ackompanjemangets över tid alltmer massiva art särskiljer den också från närliggande konstarter.

Även om det finns flera skolbildningar och sångtekniska traditioner i operavärlden är *bel canto*⁶ ett centralt begrepp. Det är främst denna stil vi tänker på som klassisk sång i den västerländska traditionen och som används i bland annat opera, men ock-

⁶ *Bel canto* betyder ordagrant ”vacker sång” på italienska, men uttrycket används som fackterm i förhållande till andra sång- och vokaltekniker och skolbildningar.

så andra typer av konstmusik. Denna stilbildande teknik uppkom under 1700- och 1800-talet och kännetecknas av resonans, smidighet, dynamik, jämna registerövergångar och legatering (sammanhållna och flödande fraser och melodilinjer), samt uthållna toner. Det är detta vi associerar med operasång och som är helt centralt i konstformen.

Sångares ljudalstring – grundtoner och övertoner

Hur skapar och kontrollerar då en operasångare ljudet så att det når ut, över orkesterdiket och till hela publiken? Ljudet innehåller både en *grundton* och ett brett spektrum av *övertoner*. Till skillnad från en vissling som bara innehåller en ton beror röstens karaktär dels på vilken grundton ljudet har, men också hur många övertoner som samtidigt finns inom det hörbara området och hur amplituden på dessa olika toner förhåller sig relativt varandra. Kortfattat skapas grundtonen och övertonerna av stämbanden och deras relativa amplitud kontrolleras sedan med hjälp av resten av röstapparaten. Strupen kan, mycket förenklat, ses som en halvsluten cylinder som dessutom kan formas med hjälp av både läppar och tunga (värt att notera att cylinderformen är lite väl förenklad eftersom även bihålorna och bröstbenet också påverkar ljudet). Vi kommer att bit för bit gå igenom de olika stegen för att skapa ljud och samtidigt dra paralleller med övertonsgenerering med ljus och attosekundpulser.

När vi talar eller sjunger använder vi oss av stämbanden, eller stämvecken, som är två slemhinneveck i struphuvudet. Stämbanden kontrollerar förbindelsen mellan lungorna och röstapparaten. För att skapa ljud sluts stämbanden och ett övertryck skapas med hjälp av lungorna och diafragman. När trycket ökar öppnas till slut stämbanden för att släppa ut en puff luft och sedan slutas igen. Processen upprepas periodiskt och skapar ett pulståg av luftpuffar. Frekvensen på puffståget är grundtonens frekvens. Genom att ändra hur spända stämbanden är går det att kontrollera frekvensen med vilken luftpuffarna genereras. Flödesdynamiken när luften passerar stämbanden och hur puffarna bildas är relativt komplicerat och kan beskrivas med hjälp av Bernoullis princip.

Om du har sjungit i kör har du säkert hört talas om röstlägena sopran, alt, tenor och bas. I opera kan man också tala om mezzosopran, countertenor, sopranista (en manlig sångare som sjunger i falsettläge), baryton och basbaryton. Dessa kategorier

sorterar människors röster utifrån tonomfång. Vilket tonomfång en röst har handlar om vilka dimensioner som stämband, struphuvud och ansatsrör (svalg och munhåla) har. Inom opera tillämpas dessutom ett detaljerat facksystem som klassificerar sångarnas röster inte bara utifrån omfång, men också *tyngd* och *färg*. Lätta, lyriska röster är smidiga och kan sjunga snabba och ornamenterade passager. Tunga, dramatiska röster kan åstadkomma ett stort ljud och kraftfullt uthållna och expansiva toner. Beroende på klang kan man även tala om tonfärg i termer som mörker, ljus, klarhet, mättnad och så vidare. Ibland används metaforer som *metallisk* eller *mjuk* för att beskriva kvaliteter i en röst — det är nästan som på en vinprovning. Operaröstens karaktär uppkommer av flera faktorer som samverkar i mötet mellan kroppens förutsättningar och sångtekniken. En operasångare måste vara medveten om sin kapacitet i förhållande till repertoaren på ett sätt som påminner om idrott (tänk löpardistans eller tyngdlyftning). Att sjunga på ett hållbart sätt kräver både träning och koncentration, för det är fina och känsliga mekanismer som är kopplade till stämbanden och den övriga röstapparaten.

Interferens och akustik i operahuset

När två eller flera vågor med samma frekvens möts kommer den spatiella intensitetsfördelningen att omfördelas — vi brukar säga att vågorna interfererar. Mönstret som bildas bestäms av vågornas frekvens och inbördes fasförhållande, men också vinkeln mellan vågornas utbredningsriktning. Det klassiska exemplet är Youngs dubbelspalt — ett experiment där Young med hjälp av ett mörklagt rum och några spelkort kunde påvisa ljusets vågnatur.

Ett specialfall är två vågor som propagerar rakt mot varandra. Även här påverkas den rumsliga intensitetsfördelningen, men nu bildas det istället vad som brukar kallas en stående våg. Stående vågor är återkommande i musiken och används för att skapa ljudet i såväl sträng- och blåsinstrument som i strupen vid sång. Ett vanligt sätt att skapa en stående våg är att låta vågen utbreda sig mot ett föremål som reflekterar den. Vi får då två motpropagerande vågor med samma frekvens. Det här används när man spelar på en flöjt eller en fiol, men det är också något som behöver tas hänsyn till när man formger en operasalong.

De första operahuset, med sin hästskoform, byggdes på 1600-talet och operasalongerna blev sociala platser dit allmänheten kom,

visade upp sig och konverserade. Det är först under senare delen av 1800-talet som vi finner den tysta och nedsläckta salongen där fullt fokus är på skådespelet och musiken. Operor har alltså inte alltid framförts i ostörda och statiska miljöer. Det största operahuset sett till publikkapacitet är idag Metropolitan Opera i New York med plats för 4000 åhörare — scenen är 27 meter djup och 31 meter bred. Orkesterdiket framför scenen i moderna operahus är en 1800-talsuppfinnning. I bygget av moderna operahus vägs flera faktorer in som förhåller sig till varandra. Det gäller till exempel balansen mellan ljudens klarhet och efterklang, balansen mellan artificiella ljudsystem och naturlig akustik samt balansen mellan spridning av ljud och urskiljandet av specifika ljudkällor till särskilda punkter.

Storleken på operahuset och orkesterns placering mellan sångare och publik för med sig en uppenbar komplikation. För att ljudet från orkester och sångare ska nå fram till publiken synkroniserat måste sångaren sjunga lite innan instrumenten tar ton. Sångarna måste alltså ligga lite ur fas — lite före — gentemot vad de ser dirigenten anvisa. Ljudet som rör sig med 340 m/s tar 79 ms att förflyttas de extra 27 meterna och på den tiden har dirigentens taktpinne hunnit röra sig ganska mycket.

Rubens tub

Annus mirabilis 1905 publicerades flera banbrytande artiklar i *Annalen der Physik*. Här syftar vi inte på Einsteins artiklar, men i samma nummer som den fotoelektriska effekten⁷ publicerades hittar vi också ”*Flammenröhre für akustische Beobachtungen*” (se figur 2) där Heinrich Rubens och Otto Krigar-Menzel beskriver hur ljuds vågegenskaper kan visualiseras med hjälp av eld och ett halvslutet rör. Det är en fantastisk metod att visualisera att ljud är en våg, en longitudinell tryckvåg, och röret kallas numera för Rubens tub.

Heinrich Rubens var en experimentell fysiker i Tyskland som var aktiv i slutet av 1800-talet och början av 1900-talet. Trots att han bland annat samarbetade med Max Planck och mätte den totala energin som strålas ut från en svartkroppsstrålare är han mest känd för tuben som nu bär hans namn⁸. Rubens tub är en halvslutet cylinder som fylls med en brännbar gas (gasol). För att behålla

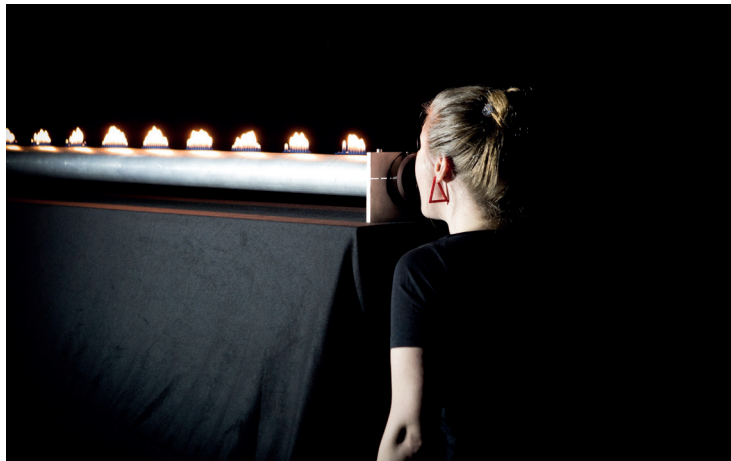
⁷ Einstein fick senare Nobelpriset för sina studier i teoretisk fysik, framförallt den fotoelektriska effekten.

⁸ Här är det väl värt att notera vikten av populärvetenskap.

5. Rudolf F. Pozděna, Versuche über Blondlots „Emission pesante“	104
6. A. Einstein, Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt	132
7. H. Rubens und O. Krigar-Menzel, Flammenröhre für akustische Beobachtungen	149
8. V. Grünberg, Farbgleichung mit Zuhilfenahme der drei Grundempfindungen im Visible Helmholtz'schen Farben	

Figur 2: Utdrag ur innehållsförteckningen från Annalen der Physik den 9 juni 1905.

gasen i röret placeras ett membran över cylinderns öppna ände. I cylinderovansidan borras en lång rad av symmetriskt placerade hål så att gasen kan komma ut och tuben trycksätts med gasol. Röret kan användas som en vacker ljusstake med ett par hundra små flammor, men det blir intressantare om vi placerar en högtalare eller varför inte en operasångerska nära membranet, som i figur 3.



Figur 3: På bilden ser ni hur det skapas en stående våg i röret när Hedvig Jalhed tar en ren ton. Vid tryckbukarna kommer flammorna att vara högre och vid noderna trycks det inte ut någon gas alls. För en stående våg är avståndet mellan två bukar en halv våglängd. För att skapa en stående våg i röret måste randvillkoren vara uppfyllda, så det är bara vissa frekvenser som skapar fenomenet. Om man sjunger i röret kommer flammorna därför att hoppa runt. I filmen som ni kommer till via QR-koden (se efter ”Vidare läsning”) sjunger Hedvig en bit ur arian *Lascia ch’io pianga* av Händel (foto: Magnus Pålsson).

Även i Rubens tub behöver vi Bernoullis princip för att förklara flödesdynamiken och effekten vi ser är kanske inte så enkel att förklara som det först verkar. Sant är att det skapas en stående ljudvåg i röret och att avståndet mellan två noder (eller mellan två bukar) är en halv våglängd, $\lambda/2$. Det går också att använda röret för att illustrera att randvärdesproblemet har olika lösningar för fallet där röret är öppet och på sidan där det är slutet. Vi noterar att eldslågorna är höga på ena sidan och närmast obefintliga på den andra. För att skapa en stående våg i röret måste ljudet som skapas av operasångaren (eller högtalaren) stämma överens med en resonansfrekvens.

Rubens tub, liksom strupen hos en sångare, kan lite förenklat beskrivas som en halvsluten cylinder. Vi kommer att använda oss av samma ekvationer för att beskriva hur man med strupen kan forma ljudet, så låt oss här gå igenom dem. För att skapa en stående våg i en halvsluten cylinder behöver vi en våg som uppfyller ekvationen:

$$\cos\left(2\pi\frac{L}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right) = \pm 1 \quad ,$$

där L är cylinderns längd. Genom att lösa ekvation fås följande våglängder som grundton och övertoner:

$$\lambda = \frac{4L}{2m-1} \quad ,$$

där $m = 1, 2, 3, \dots$. Grundtonen har alltså en våglängd som är fyra gånger längre än cylinderns längd. Frekvensen ges av:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad ,$$

där ljudhastigheten är $v = 340$ m/s, och kan alltså beräknas för en halvsluten cylinder som:

$$f = \frac{(2m-1)v}{4L} \quad .$$

Vi får alltså bara de udda övertonerna till grundfrekvensen. De jämna övertonerna uppfyller inte randvillkoren, som är olika på de två sidorna.

Olika frekvenser

Hittills har vi pratat om vad som händer när vågor med samma frekvens möts och hur intensitetsfördelningen i rummet då ändras. Om vi istället vill ändra vågornas struktur i tiden (för att till

slut kunna skapa så korta pulser som attosekundpulser) behöver vi addera vågor med olika frekvenser.

Det kanske enklaste och tydligaste exemplet där vågor med olika frekvenser adderas är så kallad svävning. När två vågor med nästan samma frekvens (gärna med samma amplitud) adderas kommer de att periodiskt driva in och ut ur fas. I exemplet i figur 4 hinner den ena vågen, P_1 , svänga elva gånger på samma tid som den andra, P_2 , bara hinner svänga tio gånger. Under den tiden kommer vågorna att ändras från att vara ur fas (den ena har ett maximum när den andra har ett minimum), till att vara helt i fas (båda har maxima), och därefter tillbaka till att vara ur fas igen. Den totala vågen P_{total} ges av summan av de två individuella vågorna:

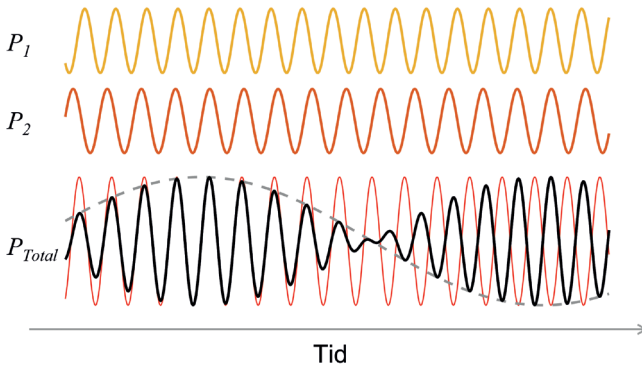
$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= P_0 \sin(2\pi f_1 t) + P_0 \sin(2\pi f_2 t) \\ &= 2P_0 \sin\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) . \end{aligned}$$

Här har vi antagit att båda vågorna har samma amplitud P_0 . Vågen kommer alltså att svänga med medelfrekvensen $\frac{f_1 + f_2}{2}$, vilket är den röda kurvan i figur 4. Nästa komponenten i ekvationen kommer att modulera den totala vågens amplitud med halva skillnadsfrekvensen $\frac{f_1 - f_2}{2}$. Eftersom intensiteten på ljudet (eller ljuset) är amplituden i kvadrat kommer svävningsfrekvensen vi hör vara precis skillnadsfrekvensen.

Den dagligt använda tillämpningen av svävning är när musiker stämmer sina instrument. Det är få förunnat att ha absolut gehör, men de flesta kan lätt plocka upp en svävningsfrekvens. Metoden att stämma ett instrument är att slå an en stämgaffel (oftast 440 Hz) och samtidigt ta samma ton på instrumentet. Hör vi nu en svävningsfrekvens vet vi att instrumentet inte är korrekt stämt. Svävningen hjälper oss också att veta om vi korrigerar instrumentet åt rätt håll, eftersom svävningsfrekvensen ökar om vi gör fel och minskar om vi gör rätt.

Övertoner

Exemplet med svävning visade att det går att ändra tidsstrukturen genom att addera vågor med två olika frekvenser. För att skapa och kontrollera riktigt korta pulser krävs att vi adderar vågor med fler frekvenser och att dessa har en välkontrollerad inbördes fasrelation. För attosekundspulser finns två huvudkategorier: De skapas antingen som ett pulståg med flera jämt fördelade ljuspulser,

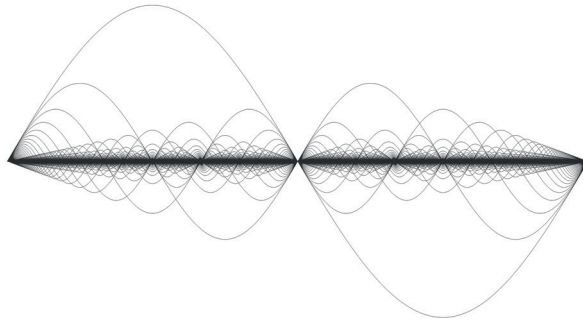


Figur 4: Två vågor med något olika frekvens adderas. Den sammanlagda vågen (superpositionen, blå kurvan) kommer att innehålla två frekvenser, varav den ena är den snabba medelfrekvensen (röda kurvan), och den andra är en långsam svävning (gröna kurvan). Fenomenet utnyttjas, till exempel, när ett instrument stäms med hjälp av en stämgaffel.

eller som ensamma, isolerade, attosekundspulser. För en isolerad puls krävs ett kontinuum av frekvenser. Om man istället skapar ett pulståg behövs fortfarande ett brett frekvensomfång, men det är nu uppbyggt av diskreta frekvenser, jämt fördelade över bandbredden.

Det som utmärker operasång och som överlappar mest med fysiken i årets Kosmos är övertonerna. Sångaren skapar inte bara en grundton, utan på samma gång en hel serie övertoner som kan sträcka sig över hela det hörbara frekvensområdet. Figur 5 illustrerar en grundton tillsammans med en serie av dess övertoner. I figur 6a visas en frekvensanalys av ljudet från en sopran som sjunger tvåstruktorna A (880 Hz). Grundtonen är såklart dominant, men som bilden visar avtar inte övertonerna så snabbt och de täcker hela det hörbara frekvensområdet.

Vad är det då som skapar övertoner i tal och sång? Luftpuffarna som skapas av trycket bakom stämbanden upprepas periodiskt och bildar ett tåg av puffar, snarare än en mjuk sinussvängning. Här kan man se att det kommer att skapas övertoner, men också se likheterna med attofysik. En fouriertransform av ett pulståg (bestående av luftpuffar eller ljusblixtar) visar att det inte räcker med grundfrekvensen utan det behövs fler frekvenskomponenter för att bygga upp tidsstrukturen. Vad fouriertransformen gör

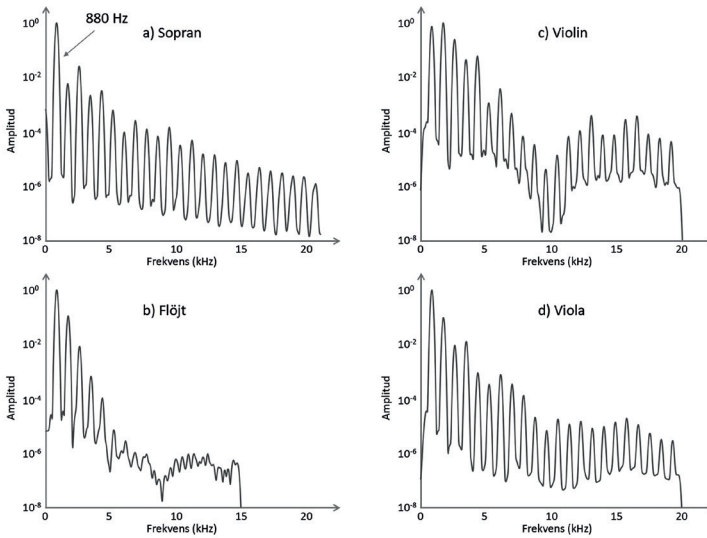


Figur 5: Grundton och övertoner med en amplitud som skalar som $1/m$, där m är ordningen, med grundtonen som $m = 1$.

är att undersöka vilka frekvenskomponenter som ingår i pulståget. För en tidsstruktur som upprepas periodiskt är de nödvändiga frekvenskomponenterna övertonerna till grundfrekvensen. Det vill säga en periodisk tidsstruktur som upprepas med en given frekvens kommer att bestå av frekvenskomponenter som är multipler av denna frekvens.

En intressant observation, relevant både för attofysik och operasång, är att även utan grundtonen kommer en serie övertoner i tiden att skapa en periodisk variation med samma frekvens som grundtonen. Vi kan alltså uppleva att vi hör grundtonen även om den inte finns med eller om den drunknar i ljudet från orkestern (ett pulståg med attosekundspulser innehåller inte heller den drivande lasern som komponent, eller för den delen de lägre övertonerna). Det är alltså operasångarens övertonrika spektrum som sträcker sig till så höga frekvenser som gör att rösten kan höras över orkestern. Som en jämförelse visar vi i figur 6 en frekvensanalys av en tvärflöjt (halvsluten cylinder), en violin och en viola som samtliga har olika övertonsspektra när de spelar (tvåstrukna A).

Övertoner på sång, framförallt vokalljud, skapas av att stämbanden producerar ett periodiskt pulståg av luftpuffar och inte en jämn sinussvängning. Kortare, mer väldefinierade, luftpuffar som en tränad sångare kan producera leder alltså till ett större frekvensomfång med fler och mer jämnstarka övertoner. Det här påminner mycket om periodiciteten i ett attosekundspulståg och det skapade övertonsspektrumet, med en skillnad: För ljus får vi ofta bara udda övertoner. För att förstå likheterna och skillnaderna



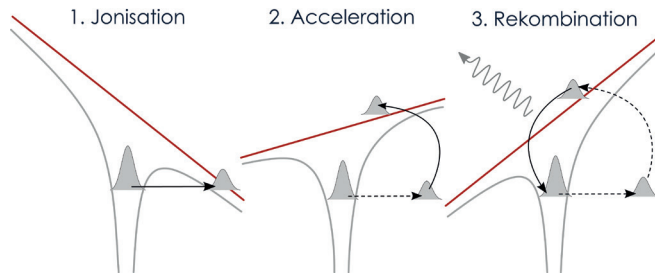
Figur 6: Frekvensanalys av ljudet från en sopran som sjunger tvåstrukna A och samma ton för tre olika instrument: a) Hedvig Jalhed sjunger tvåstrukna A (880 Hz), b) tvåstrukna A på en tvärflöjt, c) violin och d) viola. Övertoner från sopranen täcker hela det hörbara området och avtar inte lika fort som till exempel flöjten. Violin och viola är instrument med mycket rika övertonsspektra. Även om de påminner mycket om varandra går det att se en tydlig skillnad i frekvensstrukturen när de tar samma ton.

behöver vi gå in lite mer på hur attosekundspulser och höga övertoner skapas då ett starkt laserfält växelverkar med atomer.

Övertoner av ljus genereras med hjälp av starka laserpulser. För att generera övertonerna behöver fältstyrkan på lasern vara jämförbar med fältet som håller den yttersta elektronen bunden till atomen, se figur 7 för en beskrivning av processen. Laserfältet kommer att periodiskt modulera atompotentialen och möjliggöra för den yttersta elektronen att tunnla ut längs polarisationsriktningen genom den tillfälligt sänkta potentialbarriären och accelereras i laserfältet⁹. Om elektronen tunnlar ut vid rätt tillfälle finns en liten sannolikhet för den att accelereras tillbaka till atomen av laserfältet och då sända ut den ackumulerade energin som

⁹Vi arbetar ofta med ädelgaser när vi genererar övertoner och dessa har flera likvärdiga elektroner. Så fort en av elektronerna har påverkats av laserfältet kommer den snabbt att ändra sin rörelse och växelverkan med lasern blir sedan i huvudsak med denna elektron.

en mycket kort ljusblixt. Processen upprepas två gånger per ljuscykel: en gång när fältet är positivt och en gång när det är negativt. Eftersom det skapas två attosekundspulser per ljuscykel kommer det genererade pulståget att ha en grundfrekvens dubbelt så stor som frekvensen på laserfältet som genererade det. När vi fouriertransformerar tidsstrukturen ser vi att det i frekvensplanet motsvarar övertoner separerade med två gånger grundfrekvensen (två gånger grundfrekvensen motsvarar i energi två fotoner av det drivande laserfältet). Frågan är nu om dessa övertoner motsvarar udda eller jämna övertoner till grundfrekvensen? Vi får titta lite närmare på processen som genererar våra attosekundspulser. Eftersom laserfältet byter tecken mellan varje puls som genereras kommer också det genererade fältet att byta fas med π , vilket i frekvensplanet leder till udda övertoner.



Figur 7: Bilden visar de tre stegen i trestegsmodellen som beskriver processen att skapa en attosekundspuls. 1. Atompotentialen deformeras av det starka laserfältet och det finns en sannolikhet för en elektron att tunnla genom barriären. 2. Väl fri efter tunneljonisationen kan elektronvågpaketet accelereras i laserfältet, först bort från jonen och sedan tillbaka när fältet byter tecken. 3. För några jonisationstider finns en liten sannolikhet att elektronen kommer tillbaka till jonen och rekombinerar (de flesta elektroner som lämnar atomen kommer aldrig tillbaka). I rekombinationsprocessen skickas överskottsenergin ut i form av en ljusblixt. I själva verket är rekombinationen en interferensprocess där den accelererade delen av vågpaketet interfererar med den stationära delen. Denna interferens skapar en oscillerande elektrisk dipol som sänder ut ljusblixten.

Ett annat sätt att se det är att vi egentligen inte har udda eller jämna övertoner. Vad vi har är övertoner som skapas av en process som upprepas periodiskt i tiden. Eftersom periodiciteten är dubbla laserfrekvensen, kommer övertonerna att vara separerade med just den här frekvensen. De skapade pulserna har sinsemel-

lan ett fasskift på π , vilket resulterar i ett linjärt fasskift över hela pulståget. Ett linjärt fasskift i tiden motsvarar en förflyttning i frekvensrummet, och vårt övertonsspektrum skiftas ner med en halv oktav.

Det går att med olika filter kontrollera transmission och dispersion för de genererade övertonerna. För tillämpningar av attosekundpulser är det inte bara viktigt att pulserna är korta, de behöver också ha rätt centralfrekvens. Med ett filter kan man välja ut ett frekvensområde som transmitteras samtidigt som andra frekvenser blockeras. Det påminner lite om hur olika instrument utformas för att filtrera ut ett visst frekvensområde. En violin och en viola kan ta samma grundton, men det går ändå att höra skillnad och som ni kan se i figur 6 är övertonsstrukturen olika för olika instrument.

När musikerna i en orkester stämmer sina instrument innan de börjar spela, använder de ofta tonen ettstrukna A (440 Hz). Trots att alla instrument kan spela samma ton hör vi en tydlig skillnad mellan de olika instrumenten (och även sångarna när de börjar sjunga). Det beror på att instrumenten inte bara spelar grundtonen utan även har ett mer eller mindre omfångsrikt övertonsspektrum. Vilket frekvensområde som filtreras fram bestäms av resonanser i instrumentet.

På samma sätt kan vi också höra skillnad på en tenor och en sopran, och till och med identifiera enskilda individer med samma röstfack. Sångarna kan dessutom medvetet ändra formen på övertonsspektrumet så att vi hör skillnad på olika vokalljud, trots att de sjungs med samma grundton.

Formanter

För att vi ska kunna höra skillnad på olika vokalljud behöver sångaren ändra formen på ljudets övertonsspektrum. Detta görs genom att variera vilka frekvenser som är resonanta i röstapparaten. Genom att förändra läpparnas, tungans, gommens och struphuvudets positioner kan sångaren styra vilka frekvensband som är resonanta och därför kommer att höras mest — de så kallade formanterna. Operasångaren koordinerar diafragman och revbensmuskulaturen så att bröstkorgen hålls expanderad och upplyft medan utandningen pågår och tonen kan hållas stabil med ett jämnt luftflöde genom stämbanden. Struphuvudet hålls lågt (tänk på hur det känns i halsen när du gäspar och struphuvudet sänks och jämför

med hur det känns när du sväljer och struphuvudet höjs) och käken är så avslappnad som möjligt. Det låga struphuvudet gör att formanterna — i synnerhet den första — uppfattas som mörkare. Detta är ett kännetecken för tränade operaröster, men har också effekten att vokalljuden ibland blir mindre distinkta. Luften passerar sedan strupen som kan liknas vid en halvsluten cylinder och som används för att ytterligare forma ljudet.

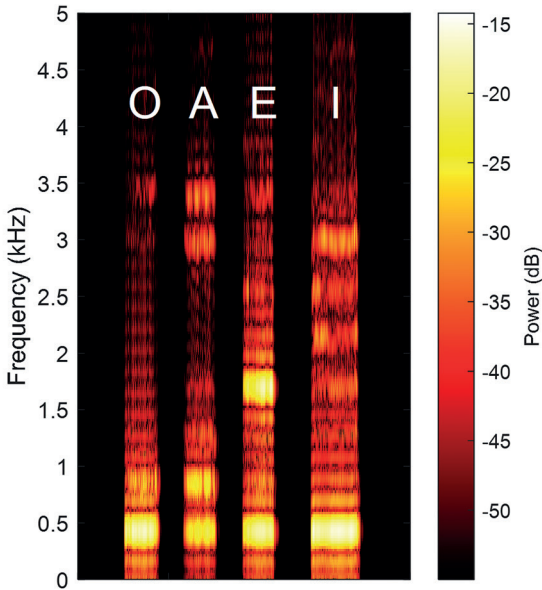
Att strupen påminner om en halvsluten cylinder är lite förenklat, men användbart. Stämbanden är den slutna sidan och munöppningen vid läpparna den öppna sidan. På samma sätt som för Rubens tub kan vi räkna ut olika resonansfrekvenser för olika långa strupar. Strupens längd är i genomsnitt 14 cm för vuxna kvinnor och 17 cm för män (ett medelvärde på hela populationen landar runt 15,5 cm). För de här olika struplängderna får vi följande tre lägsta resonansfrekvenser:

17 cm	15,5 cm	14 cm
500 Hz	550 Hz	610 Hz
1500 Hz	1650 Hz	1820 Hz
2500 Hz	2750 Hz	3035 Hz

De här resonanserna brukar kallas för formanter och påverkar det skapade ljudet. Stämbanden skapar en övertonsrik ton, men vilka övertoner som finns kvar efter att de passerat strupen beror på om de stämmer överens med formanterna.

Formanter är något vi med våra mänskliga öron uppfattar varje gång vi hör språk och kan särskilja olika ljud. Det finns teorier om att detta har varit en evolutionär fördel för oss människor som hypersocial art, eftersom det har hjälpt oss identifiera individer och uppskatta kroppars dimensioner, ålder, hälsotillstånd och så vidare bara genom den information rösten ger. Med konstnärliga tekniker har vår intuitiva förmåga att uppfatta övertoner kunnat utnyttjas, raffinerats och formaliseras vidare. Operasolistens personliga *timbre* (röstfärg) är till skillnad från körsångarens alldeles avgörande. Resonanstopparna som utgör formanter i den mänskliga rösten skapas när tonen tar form i halsen, munnen och näshålan och olika formanter ger olika vokalljud sin distinkta karaktär (se figur 8 för en frekvensanalys av olika vokalljud). Ibland talar man om den så kallade sångarformanten, som är den särskilda spektrumtoppen nära 3000 Hz som hörs igenom orkestern med sin ringande karaktär oavsett vilken vokal som sjungs. Vad

som framförallt möjliggör formandet av formanter som vokalljud är den mänskliga tungans och läpparnas rörlighet.



Figur 8: *Frekvensanalys av fyra olika vokalljud sjugna med samma grundton. Alla vokalerna har 440 Hz som grundton, men strukturen på övertonerna med olika formanter gör att vi hör dem som olika vokalljud.*

Till skillnad från Rubens tub är strupen och talapparaten inte ett stelt rör. Det är tvärtom mycket formbart. Framförallt läpparna och tungan gör det möjligt att forma cylindern och på så sätt ändra vid vilka frekvenser formanterna uppträder, till viss del deras styrka, men framförallt deras relativa frekvens. Med tunga tänker vi ofta på den lilla tungspetsen fram till i munnen (och den är viktig för att kunna forma konsonanter), men tungan är ett mycket större organ än så. Formanterna ändras framförallt av var och hur mycket tungan ändrar strupens utformning baktill i svalget. Med läpparna kan sångaren ändra randvillkoret i ena änden av cylindern och därmed också formanterna (var ljudvågen reflekteras i den öppna delen av cylindern beror på öppningens form).

Innan vi går vidare med hur olika vokalljud skapas med hjälp av formanterna är det instruktivt att se hur läppar och tunga ändras och rör sig när en operasångare sjunger. Vid tidiga studier av talapparaten röntgade man sångare för att se hur tunga och läp-

par ändrade form vid olika vokalljud. För att undvika joniserande strålning lät vi istället Hedvig Jalhed sjunga i en MR-kamera.

En operasångare i genomskärning

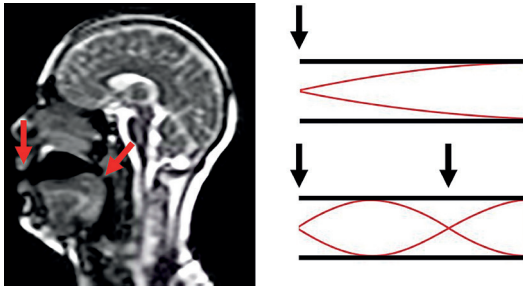
För att i realtid studera hur talapparaten, och framför allt tungan, rör sig och ändrar form när en operasångare sjunger använde vi oss av en MR-kamera. Vi lät medförfattaren Hedvig Jalhed ligga i kameran och sjunga både delar av arior och olika vokalljud (se figur 9). Kameran som användes var en 1.5 Tesla Siemens Aera, en kamera som på sjukhus används för ta bilder på bland annat hjärta och rygg. Ofta används en MR-kamera för att ta en tredimensionell bild. Det tar ganska lång tid och patienten måste därför ligga helt stilla. Man kan istället välja att bara titta på ett tvådimensionellt snitt och kan då göra avbildningarna mycket snabbare och därmed möjliggöra filmsekvenser av talapparaten när sångaren sjunger. Snittet valdes rakt genom munhåla och strupe. För att kunna ta bilderna tillräckligt snabbt för att göra en film av dem behöver man kompromissa lite med både upplösning och signalstyrka. Bildtagningen som gjordes gav en film där varje filmruta är ungefär 0,05 sekunder. Varje pixel i bilden är $3 \times 3 \text{ mm}^2$ (för vissa sekvenser $2 \times 2 \text{ mm}^2$).



Figur 9: Profilbild av Hedvig, dels i genomskärning i MR-kameran och dels en normal profilbild, när hon sjunger "Lascia ch'io pianga". Fotograf: Mattias Rylander Finns även som video, se QR-koden (efter "Vidare läsning").

Från MR-bilderna går det tydligt att urskilja läpparnas rörelse och hur tungan formas olika bak i svalget när olika toner skapas.

Det är framförallt de två lägsta formanterna som är viktiga för vilken vokal vi hör och vi kommer här att fokusera på hur de formas. Den lägsta formanten motsvarar den lägsta resonansfrekvensen i den halvslutna cylindern, alltså en kvarts våglängd med en trycknod framme vid läpparna. För att påverka den stående vågen med den lägsta frekvensen behöver vi ändra formen av cylindern vid trycknoden. Det visar sig att om man ökar cylinderns volym vid en trycknod höjs resonansfrekvensen (och omvänt om volymen minskas)¹⁰. Den andra formanten motsvarar en stående våg där tre fjärdedelar av våglängden får plats i cylindern. För den här formanten har vi alltså två trycknoder, återigen en vid läpparna och en andra två tredjedelar av sträckan bak i svalget (se också figur 10). I svalget kan tungan kontrollera cylinderformen och även var den smalnas av. Genom att minska cylinderdiametern bak i svalget kan vi sänka frekvensen på den andra formanten.

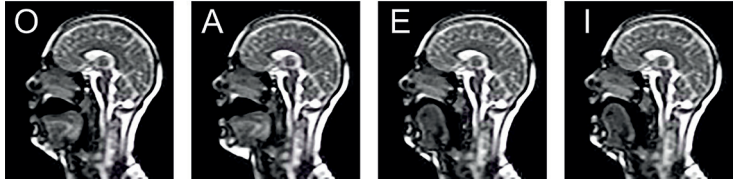


Figur 10: En MR-bild när sopranen Hedvig Jalhed sjunger vokalen o vid 440 Hz. För ett o är de två första formanterna låga, så cylindervolymen behöver minskas både vid läpparna och baktill i strupen. Till höger visas de två lägsta resonansfrekvenserna i en halvsluten cylinder. Pilarna markerar trycknoder och är också de ställen där tunga och läppar ändrar cylinderns form för att skapa formanterna.

För att undersöka överensstämmelsen mellan formanternas frekvens och talapparatsens form har vi jämfört MR-bilder med frekvensanalyser. Med en grundton på 440 Hz (ettstrukna A) får vi ett relativt tätt övertonsspektrum och kan identifiera var formanterna är för olika vokaler, se figur 11. När vi räknar på en cylinder får vi tydliga, skarpa resonanser, men de formade formanterna är gans-

¹⁰Om vi hade haft en perfekt konformad struktur istället för en cylinder hade resonansfrekvenserna varit dubbelt så höga.

ka breda frekvensstrukturer. Trots det går det tydligt att se skillnader. Vi fokuserar på vokalerna O-A-E-I (som i de svenska orden hot, hat, het, hit).



Figur 11: MR avbildningar av Hedvig Jalhed när hon sjunger olika vokalljud. Det är samma vokalljud vars frekvensanalyser presenterades i figur 8. Det är framförallt hur öppen munnen är och tungans position som bestämmer frekvenserna för de två lägsta formanterna och därmed vilka vokaler vi uppfattar.

Om du själv säger O och A märker du hur munnens form ändras. Med O har du en liten öppning och när du säger A öppnar du munnen mer. Detta påverkar framförallt den första formanten och mycket riktigt kan vi se att den ligger betydligt högre för A. På MR-bilderna för O och A kan vi se att tungan är långt bak i halsen vilket gör att den andra formanten är låg. För E och I kan vi istället se att tungan har öppnat upp i svalget för att på så sätt öka frekvensen på den andra formanten. I frekvensanalysen blir det tydligt att så är fallet. Det går alltså att placera in olika vokaler i ett diagram med de två första formanternas frekvenser på vardera axel.

Finale

Vi har sett att både ljud och ljus har övertoner med många likheter. En högintensiv laser skapar ett attosekundpulståg med två korta ljusblixtar per lasercykel. De korta pulserna och den periodiska upprepningen av dessa motsvarar i frekvens flera väldefinierade övertoner som sträcker sig långt ut i det extremultravioletta frekvensområdet. På liknande sätt genererar den tränade operasångaren en periodisk serie luftpuffar med hjälp av konstant lufttryck bakom stämbanden. Den här serien luftpuffar skapar en grundton och en lång serie övertoner. Är puffarna tillräckligt korta kan övertonerna täcka långt mer än det hörbara frekvensområdet.

Spektrala filter används för att välja ut delmängder av övertoner av både ljud och ljus. Adaptiv frekvenskontroll av resonans-

frekvenserna i strupen med hjälp av tungan gör det möjligt för oss att skapa olika vokalljud. För ljus kan metallfilter användas för att välja ut det frekvensområde som bäst lämpar sig till att studera specifika atomer. Attosekundspulserna ger oss sedan möjlighet att se in i atomer och molekyler och följa elektrondynamiken. De ger oss också möjlighet att påverka hur elektronerna rör sig. Opera-sångarens övertoner, å andra sidan, svävar över orkestern och når fram till varje åhörare, där de likt attosekundspulserna berör varje individ fysiskt och kognitivt.

Operans sammanhang fortsätter än idag att förändras och utvecklas, men fortfarande är det den lilla människans fysiska kapacitet att, mot alla odds och bortom gruppens trygghet, uttrycka sig kontrollerat, säkert och kraftfullt som fortsätter att motivera operakonsten som ramverk för nya hjältesagor, symboliskt och filosofiskt. Och kanske även vetenskapligt — för just i opera-sångarens praktik möts fysik och fysiologi, natur och kultur på ett högst påtagligt sätt.

Tack till

Att arbeta tvärdisciplinärt är både utmanande och stimulerande. Fokus i det här projektet ligger på fysik och opera, men för att studera detta har vi besökt MR-faciliteten vid Skånes universitetssjukhus i Lund, humanistlaboratoriet vid Lunds universitet för inspelningar, Inter Arts Center och lånat höghastighetskameror av andra kollegor. Vi vill därför rikta ett stort tack till flera personer som har hjälpt oss att göra detta möjligt: Karin Markenroth Bloch, Felicita Brusoni, Johannes Töger, Mattias Richter, Magnus Pålsson, Jonas Jönsson, Margot Edström, Michel Thomas, Peter Roslund, Malin Sjö, Cornelia Mauritsson och Mattias Rylander.



Vidare läsning

- Johnston, I. (2009). *Measured Tones: The Interplay of Physics and Music* (2:a uppl). CRC Press Inc.
- Stark, J. (2003). *Bel Canto: A History of Vocal Pedagogy*. University of Toronto Press.
- Sundberg, J. (1989). *Musikens ljudlära: Hur tonen alstras och uppfattas*. Proprius.
- Sundberg, J. (2007). *Röstlära: Fakta om rösten i tal och sång*. Konsultfirma Johan Sundberg.



Vinjettbilden i sin helhet: Auditoriet/salongen på La Fenice-operan i Venedig.



*Länk till Hedvig Jalheds sånger på
www.fysikersamfundet.se/kosmos-filmer/*