

# Om strengefysikk og bueteknikk – med sideblikk til forskning og formidling

*Knut Guettler*

*Professor Tekn. Dr., Norges musikkhøgskole, Oslo*

## Abstract

Denne artikkelen vil prøve å gi en kortfattet oversikt over hvor forskningen på strykeinstrumentenes akustikk står i dag. Det vil særlig bli satt fokus på den delen av forskningen som er relevant for utøveren, det vil si analyse av forholdet mellom bue og streng, og hvorledes håndteringen av buen påvirker klangen. Enkelte aspekter av forholdet utøver/forsker vil også bli drøftet ut fra forfatterens erfaringer i begge leire.

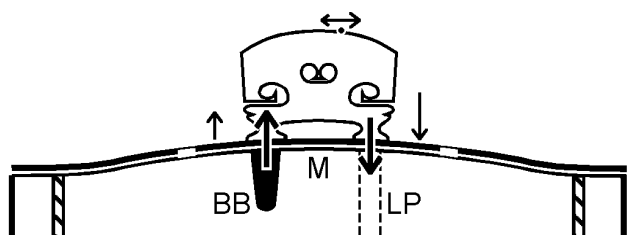
## 1. Innledning

”Gode buehår har distinkte ’skjell’ som griper strengen og skaper den nødvendige friksjon for en god tone.” ”Lydpinnens oppgave er å overføre vibrasjoner mellom instrumentets lokk og bunn.” Disse to utsagnene er velkjente for de fleste strykere. Selv har jeg hørt dem gjentatt en rekke ganger fra anerkjente lærere, og i master classes gitt av utøvere fra det internasjonale toppsjiktet. Jeg har også sett dem på trykk i fagtidsskrift for strykere. Sitatene demonstrerer på en interessant måte hvordan Mester/lærlingtradisjonen ofte virker: Gårdagens lærdom blir lov dersom den overbringes med tilstrekkelig autoritet, selv om autoriteten er ervervet innen et helt annet fagområde. Begge utsagnene mangler imidlertid støtte i virkelighetens verden, om enn de umiddelbart kan virke logiske. Aristoteles – ofte omtalt som ”vitenskapens grunnlegger” – ble visstnok selv offer for lettvtint ”logikk” da han en gang skal ha uttalt at ”*summen av en plantes vekt og vekten av den jorden den vokser i forblir konstant.*” Hadde han tatt bryet med å veie planten med potten den sto i, ville han raskt ha oppdaget at den totale vekten øker! Dette ville neppe ha gjort ham og hans samtidige til bedre gartnere, men i moderne planteproduksjon er kunnskap om fotosyntese som forutsetning for å ”trekke kulldioksyd ut av lufta” et svært viktig element. Hva angår buehår og lydpinne, har det i mer enn halvannethundre år vært vitenskapelig kjent at buehårenes skjell ikke har noen betydning for spilleegenskapene, og at lydpinneens primære oppgave er å danne et stasjonært punkt som lokket kan vippe på (se neste avsnitt). Likevel formidles fremdeles ”de gamle sannheter” med uforminsket styrke fra lærer til elev. Dette synes kanskje uvesentlig så lenge musikerne beviselig oppnår gode resultater likevel, men problemstillingen peker på flere forhold:

(1) Når en lærer velger å benytte slike konkrete bilder (riktige eller uriktige) er det vanligvis del av en argumentasjon som skal få eleven til å forandre noe i spillet sitt, eventuelt forstå hva han/hun gjør riktig. Billedbruk er ofte til god hjelp i slike situasjoner. Det finnes imidlertid en hake ved dette: Dersom eleven ønsker å oppnå en musikalsk effekt som ligger utenfor lærerens/tradisjonens erfaringsfelt vil han/hun høyst sannsynlig dra bedre nytte av *korrekt* informasjon enn en *allegorisk* representasjon ”designet” for å illustrere en annen eller mer begrenset del av fenomenet. Min påstand er altså at foreldet/feilaktig billedbruk primært tjener sin gode hensikt så lenge man holder seg innen en tradisjon. (2) Høyere undervisningsinstitusjoner bør føle et spesielt ansvar med hensyn til å kvalitetssikre den informasjonen de formidler som ”objektiv sannhet”. (3) Det har helt klart vært svært dårlig kommunikasjon mellom akustikere og utøvere av tradisjonell ”klassisk” musikk på en rekke felt. Det kan være flere grunner til dette.

## 2. Et raskt tilbakeblikk<sup>1</sup>

De instrumentmakerne som tidlig på 1500-tallet fikk den geniale idé å flytte strykeinstrumentets innvendige bærebjelke fra dens tradisjonelle plass langs midten og ut til et sted under strenge-stolens fot på bass-siden, og likeledes plasserte en stang mellom det tynne lokket og instrumentets bunn, nær (foran) foten på diskantsiden, var klart de første eksperimentatorene innen fiolinakustikk. Hvor mye de forsto av hvordan dette forandret lydutstrålingen er ikke godt å si, men resultatene var virkelige nok: Om en tenker seg at strengens vibrasjoner (som stort sett ligger i plan med lokket) prøver å skyve stolen fra side til side (se figur 1), vil dette føre til at stolen samtidig "flytter vekten" fra den ene foten til den andre. Hvis bjelken ligger på midten vil således lokket på den ene siden bli trykket ned like mye som den andre siden beveger seg opp; dermed blir det ikke noen forandring av kroppens totale volum. Tomrommet som oppstår der lokket trykkes ned fylles raskt av den luften som presses opp på den andre siden av midtbjelken, mens lite eller ingen luft presses mot tilhøreren. Det blir med andre ord liten lydutstråling fra instrumentet. Ved å gjøre lokkets bevegelighet asymmetrisk oppnår man en netto forandring i kroppsvolumet ved de lave frekvensene: Fiolinkroppen "pulserer"; klangen blir både fyldigere og sterkere.



**Figur 1:** Når strengen svinger i horisontalplanet veksler de vertikale kreftene fra fot til fot på stolen, med den følge at den ene foten går opp mens den andre går ned. Dersom bassbjelken (BB) hadde vært plassert på midten (M) ville denne bevegelsen vært like stor på begge sider. Lydpinnen (LP), som står litt foran stolens diskant-fot, spiller en liknende rolle, som et stabilt vippepunkt for lokket i lengderetningen.

Den første som beskrev noen av disse prinsippene var den franske fysikeren Felix Savart (1791-1841). Fra fiolinmakeren Jean Baptiste Vuillaume (1798-1875) fikk Savart låne løse topp- og bunnplater kreert av Stradivari, Guarneri del Gesu og andre førsteklasses instrumentmakere. Slik kunne han analysere hvordan platene beveget seg ved ulike frekvenser<sup>2</sup>. I motsetning til den vanlige oppfatningen hos datidens (og dessverre også nåtidens!) musikere og instrumentmakere, at "lydpinnen formidler bølger mellom lokk og bunn", oppdaget han raskt at lydpinnen primært virker som et stasjonært punkt rundt hvilket lokket kan vippe. Ved å ta pinnen ut av en (samlet) fiolin, og i stedet presse den mot lokket fra oversiden, kunne han observere at klangen holdt seg forbausende uforandret bortsett fra for de dypeste frekvensene, som ble noe svakere. Om lydpinnen ble fjernet, ble tonen matt og uten briljans. Dette skjedde på en tid da fysikerne hadde begynt å studere bølgebevegelser i plater av ulik form ved å helle på et tynt lag spon, og eksitere platen ved ulike frekvenser slik at sponene samlet seg der platen beveget seg minst (Chladnis metode). Savart må sies å ha vært den første som på et vitenskapelig grunnlag gjorde grundige analyser av fiolinens virkemåte.

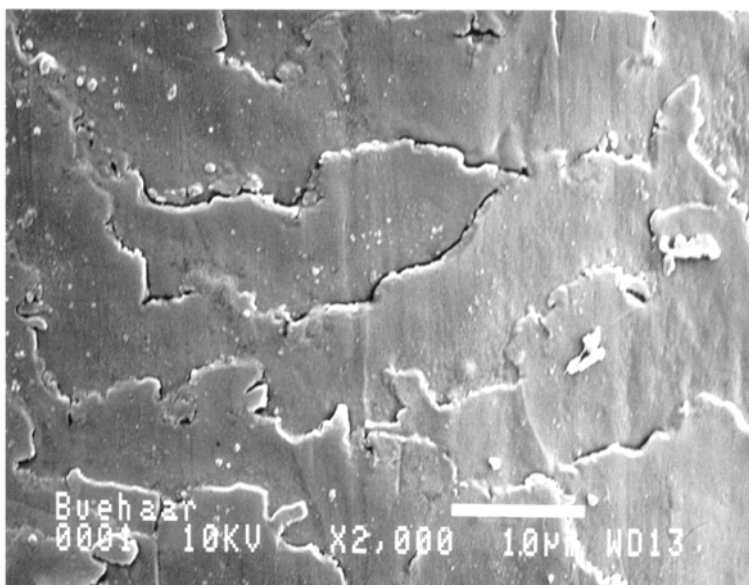
Dette betyr ikke at ikke enkelte fysikere hadde gjort observasjoner relatert til strykeinstrumenter tidligere: Den franske presten og vitenskapsmannen Marin Mersenne (1588-1648) hadde i 1625 publisert følgende observasjoner for en ideell streng: Frekvensen er proporsjonal med kvadratroten av strekk-kraften, og omvendt proporsjonal med strengelengden og strengens diameter. Dette stemte bra for datidens homogene tarmstrenger, der strengens vekt per lengdeenhet øker med diameteren i annen potens. En mer moderne formel lyder:

$$\text{Frekvens} = \frac{1}{2 \times \text{Strengelengden}} \sqrt{\frac{\text{Strekk-kraft}}{\text{Vekt per lengdeenhet}}}$$

Denne formelen gjelder også for strenger med overspining av et annet (tyngre) materiale, som muliggjør design av tynnere, og dermed mer bøyelige, strenger. (Større bøyelighet gir større briljans.) I en avhandling et par hundre år senere beskrev matematikeren Jean-Marie-Constant Duhamel (1797-1872) hvordan bølger forplantet seg *langs* strengen med en viss hastighet, hvilket gav forklaring på Mersennes observasjoner. (Strengen bølger altså ikke fra side til side, som det kan se ut til!)

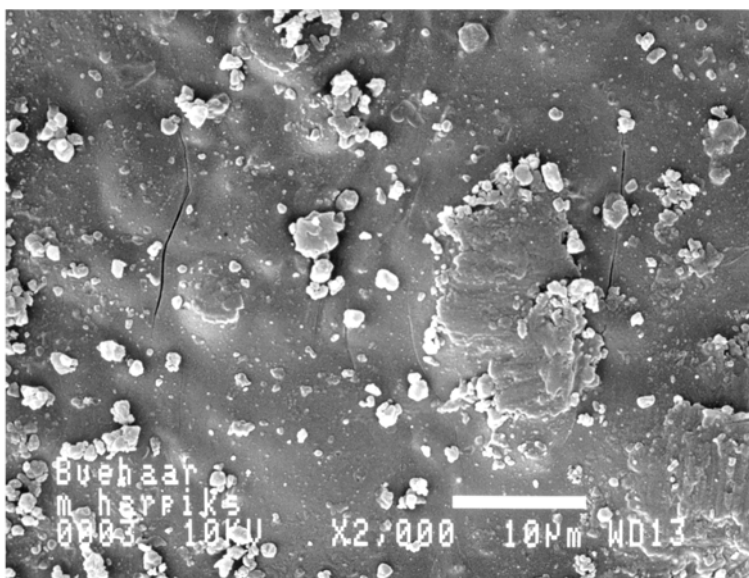
Bemerkning: I formelen ovenfor er rottegnet med innhold identisk med bølgenes forplantningshastighet langs strengen. På en fiolin A-streng beveger bølgene seg med en hastighet av ca 290 meter i sekundet, dvs, mer enn tusen kilometer i timen! (Til sammenlikning er lydets hastighet i luft ca 330 m/s.) Derfor kan man aldri se selve bølgene, kun et omriss av deres bane. På E-strengen er forplantningshastigheten ytterligere 50% høyere!

Videre hadde Duhamel observert at skjellene på buens hår var så små at de umulig kunne få tak i en streng med normal diameter<sup>3</sup>. (Faktisk rager skjellene opp fra hårstammen mindre enn én totusendels millimeter<sup>4</sup>). At dette med hårskjellenes gripeevne var (og fremdeles er) en så populær forestilling blant strykere og fiolinmakere er egentlig ganske uforståelig, all den tid mange av dem sikkert har prøvd å spille med nye buehår før det har kommet harpiks på: De glir ganske enkelt glatt over strengen og er absolutt umulige å spille med! Selv om hårene hadde gitt tilstrekkelig friksjon ville det fremdeles ikke ha blitt noen tone. For å danne en tone på en fiolinstreng er det forutsetning at friksjonen *veksler* raskt mellom statisk (dvs si ”med grep”) og glidende. I begynnelsen av ansatsen må den statiske friksjonskraften kunne nå vesentlig høyere verdier enn den glidende om en vanlig god tone skal kunne dannes. Om hårskjellene hadde vært store nok til å bidra med noe som helst etter at harpiks var lagt på, ville det ha økt friksjonskoeffisienten for begge typer, med den følge at den vibrerende strengen ville bli dratt enda litt lenger ut til siden. (Og frekvensen gått litt opp, men det er en annen sak...) Gode buehår gir ikke selv friksjon, men lar harpiksen sitte jevnt på, selv i tynne lag, hvilket har sammenheng med hårenes kjemi heller enn deres overflatestruktur<sup>5</sup> (se figur 2).



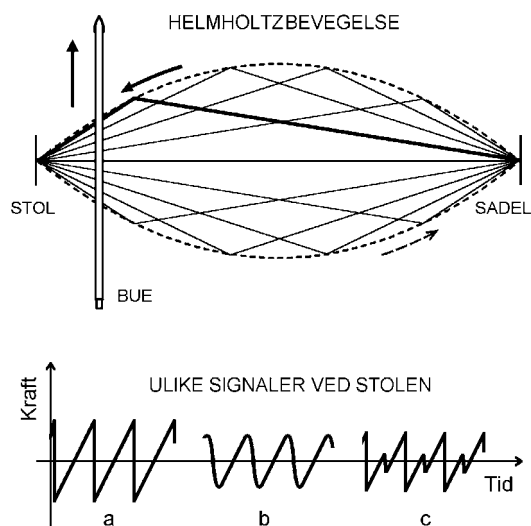
**Figur 2:** Buehår betraktet i elektron-mikroskop (foto: NTH, Trondheim).

Øverste panel viser rene hår med tydelig markerte skjell. Den hvite streken markerer én tusendels millimeter. Skjellene rager ikke høyt nok opp til å kunne skyve på noen streng.



I panelet under er det lagt på harpiks. Skjellene er fullstendig dekket. Små partikler av harpiks, virvlet opp under spill med buen, ligger oppå det glattere underlaget av tidligere smeltet harpiks. Når strengen glir på bueharene skyves både smeltet og fastere harpiks foran strengen langs hårene. Dette fører til et karakteristisk "sus", som er en del av strykerklangens egenart.

På midten av attenhundretallet utførte den tyske lege og forsker Hermann von Helmholtz (1821-1894) et betydelig arbeid når det gjaldt å forklare en lang rekke fenomener innen hørsel og toneproduksjon. Arbeidet kulminerte i utgivelsen av *"Lehre von den Tonempfindungen"* i 1862<sup>6</sup>. For å undersøke hvorledes strengen vibrerte under pizzicato og arco konstruerte han oppfinnsomt et vibrerende mikroskop hvor han kunne betrakte de lynhurtige strengebølgene i langsom kino. Han observerte at i pizzicato er bevegelsesmønsteret et helt annet enn i arco, der strengen veksler periodisk mellom å gripe og slippe bueharene. Og i stedet for å danne en myk bue, slik det synes når man betrakter den, utgjør strengen i arco stort sett to rette linjer, sammenføyet i et skarpt hjørne som roterer i en parabolisk bane (se figur 3). Denne bevegelsen har senere fått navnet "Helmholtzbevegelsen".



**Figur 3, øverst:** Helmholtzbevegelse i fiolinstreng under spill med bue. Ved oppstrøk roterer det skarpe hjørnet mot klokken. Idet hjørnet passerer buen på vei mot stolen slipper strengen bueharene og glir tilbake (dvs. *ned* på tegningen). Etter en refleksjon ved stolen, går hastighetsforskjellen mellom streng og bue igjen mot null idet hjørnet passerer harene vei mot sadelen. Dermed kan strengen på nytt klebe seg til harene, og bli hengende fast ved dem resten av perioden. På en løs fiolin A-streng roterer hjørnet rundt på denne måten ca 440 ganger per sekund.

**Nederst:** Under Helmholtzbevegelse vil kraften som virker (sidelengs) på stolen ha sagtannsform. Avhengig av hvor skarpt hjørnet brekker strengen, vil signalet (her vist ca 3 perioder) kunne variere mellom (a) og (b), som gir hhv. skarp og bløt klang. Om *to* hjørner dannes, kan flere glipp oppstå, og klangen blir glassaktig uten fylde (c).

Hvor skarpt dette hjørnet blir avhenger blant annet av "buetrykket". Hvis buetrykket (buens kraft mot strengen) er stort, får vi et signal tilnærmet lik (a) i nedre panel. Da skjerpes hjørnet hver gang det passerer buen, hvilket gir skarpere/mer briljant tone. Med lavt buetrykk rundes hjørnet av, grunnet en viss stivhet i strengen, indre og ytre friksjon, bevegelse i stol og sadel, osv. Signalet ved stolen ser da mer ut som (b), og tonen blir bløtere. Dersom vi har vært uforsiktlige i ansatsen kan vi risikere at strengen glipper på buen mer enn én gang per periode. I så fall blir tonen glassaktig uten dybde. Signalet kan se ut som (c).

Det neste store skrittet i arbeidet med å forstå hvordan strykeinstrumentene virker ble tatt av den indiske forskeren Chandrasekara V. Raman, (som i 1930 mottok en Nobelpris i fysikk for sitt arbeid innen spektroskopi). I 1918 publiserte han et teoretisk verk om "Strykeinstrumentenes vibrasjoner"<sup>7</sup>, der han viste at musikeren i prinsippet kunne kontrollere Helmholtzbevegelsen ved hjelp av tre faktorer: Buens *posisjon på strengen*, buens *hastighet*, og buens "*trykk*" mot strengen (korrekt term i fysikk er *kraft*, men pedagogisk gir dette uheldige assosiasjoner). For en stryker virker kanskje denne informasjonen som selvfølgeligheter, men Raman regnet ut hvilke krefter som virket på buen, forholdet mellom overtonene, og viste hvordan strøket måtte forandres (minimumsbuetrykket økes) der instrumentet hadde toner med spesielt store resonanser. Hele tiden sammenliknet han sine beregninger mot eksperimenter på en maskin der en hvilken som helst tone kunne spilles på fiolin med en bue som ble mekanisk drevet, og hvor trykk, posisjon og hastighet ble utført med stor nøyaktighet. Nå var musikerens kontroll brakt inn i bildet.

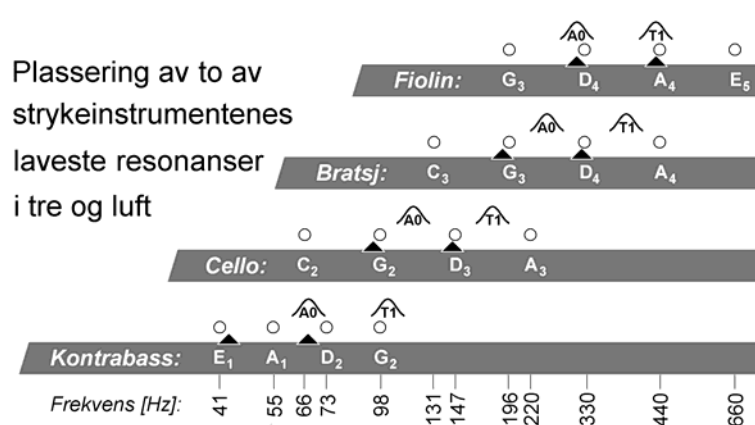
I perioden som fulgte ble det drevet ganske intens forskning i en rekke land som Russland, U.S.A., Frankrike, Italia, England, Japan, men kanskje mest av alt i Tyskland. I tillegg til å videreføre Savarts arbeid på karakteristiske vibrasjoner i lokk og bunn (de såkalte *moder*) var forskerne mest opptatt av lakk og egenskaper ved instrumentenes trevirke. (I våre dager er det meg bekjent ingen forskere som omtaler lakk som "Stradivaris hemmelighet" eller forsker på dette. Derimot forskes det på kjemiske metoder for å kunne forandre treets akustiske spesifikasjoner.) Man begynte så smått å få en vitenskapelig forståelse av enkelte egenskaper som skilte et fremragende instrument fra det jevne.

Et kraftig puff fremover skjedde da en amerikansk gruppe, som spøkefullt kalte seg ”The Catgut Acoustical Society” (kattetarmens akustiske selskap) kom sammen tidlig på 50-tallet. Gruppen, som også utgjorde en strykekvartett, besto av en fysiker, en elektroingeniør, en kjemiker og en fiolinmaker med bakgrunn i biologi og fysikk. Deres organisasjon ble formelt opprettet i 1963 med formålet ”å øke og formidle viten innen musikkakustikk, og arbeide for bygging av høykvalitets strengeinstrumenter”. Organisasjonen ble raskt et ledende internasjonalt forum for denne type forskning, og for instrumentmakere som ville prøve ut ideene i praksis. I dag har Catguts medlemsmasse vokst til mer enn 800 fele- og gitarmakere, forskere og musikere, som kommuniserer gjennom halvårlige medlemsblad. I de seneste årene har andelen instrumentmakere økt betraktelig, og mange av dem benytter daglig metoder for kontroll og plate-avstemming som er utviklet i dette forum.

### 3. Så, hva vet vi om strykeinstrumenter i dag?

#### 3.1. Fiolinen som forbilde – ”Det ideelle strykeinstrument”

Noe av det første Catgut-gruppen gjorde var å sammenlikne de større strykeinstrumentene med fiolinen. På mange måter er fiolinen det ideelle instrument hva angår utstråling og klangfylde. Som konstruksjon kan f. eks. bratsj ikke sies å være like vellykket, selv om det finnes mange gode eksemplarer også av dette instrumentet. Hva skyldes forskjellen? På alle strykeinstrumentene ligger det resonanser i serier, og disse skal helst skal utfylle hverandre best mulig, og ligge i korrekt avstand fra hverandre. For eksempel ligger den laveste resonansen på en fiolin vanligvis i nærheten av enstrøken C# (ca 277 Hz). Denne er avhengig av kroppens indre (luft-) volum og størrelsen på *f*-hullene. Om du blåser forsiktig mot kanten av et *f*-hull vil du kunne høre akkurat denne resonansen idet luft blir pumpet ut og inn av *f*-hullene. Over ligger andre ”luftresonanser” tettere og tettere. Så har vi ”tre-resonansene”, delvis separate for lokk og bunn. I den laveste av dem (som vanligvis ligger en god kvint høyere enn den første luftresonansen) beveger en stor del av lokket seg som ett stykke. Det er denne som kan gi opphav til wolf-toner, fordi stolen, som følge av lokkets store bevegelser, beveger seg *for mye* i det punktet der strengen holdes oppe. Vanligvis opptrer dette bare på de større strykeinstrumentene, der stolen er relativt høy i forhold til bredden slik at utslaget ved strengen blir større. Det finnes resonanser som alene er avhengig av instrumentets lengde, bredde, osv, osv. Om man skulle lage en bratsj der *alle* resonansene lå i samme forhold som på fiolinen, ville man måtte lage et instrument som sammenliknet med fiolinen var 50% lenger (dvs omvendt proporsjonalt med frekvensforholdet) og veie ca et kilogram mer. Strengelengden ville være nær 50 cm. På samme måte ville en kontrabass veie ca 122 kg, og ha en strengelengde på 2,2 meter. Litt upraktisk kanskje...



**Figur 4:** Normal  $\wedge$  og ”ideell”  $\blacktriangle$  plassering for to av strykeinstrumentenes laveste resonanser: **A0** = luftresonans; **T1** = trestonans (størst bevegelse i lokket); **O** = strengenes stemming. Om de større strykeinstrumentene skulle hatt en resonansplassering tilsvarende fiolinenes, måtte disse lave resonansene flyttes nedover til den ”ideelle” plasseringen. Dette er teknisk mulig, og er demonstrert i ”The New Violin Family” utviklet av Catgut-gruppen.

Men gruppen fant ut at mange av disse resonansene kunne justeres relativt uavhengig av instrumentets størrelse dersom man ga slipp en del tradisjoner med hensyn til form og avstemming. Og de beviste sine teorier ved å konstruere en hel familie av strykeinstrumenter i forskjellige størrelser, 8 i alt, som alle hadde resonansintervaller som liknet godt på fiolinens ("The New Violin Family"). Gruppens bratsjist, Carleen Hutchins (en førsteklasses, eksperimenterende, "ikke-kommersiell" felemaker), som bygget disse, bemerket en gang under en akustikk-konferanse: "Jeg er egentlig ikke ferdig med noe instrument før jeg har ødelagt det fullstendig". Undertegnede har ved et par anledninger hatt gleden av å høre disse instrumentene i konsertfremførelser (før de ble "ødelagt"), og har fått lov til å spille på noen av hennes basser. Det er selvsagt forvirrende at mensuren er uvant, men klangen er rett og slett fantastisk! Både bass og bratsj låter atskillig mer åpent enn det vi er vant til, og de er utrolig lettspilte... Om du ønsker å høre dem, finnes det CD innspillinger<sup>9</sup>, bl.a. en der Yo-Yo Ma spiller Bartoks Konsert for Bratsj og Orkester<sup>10</sup> på *alt-fiolin* (holdt vertikalt, med pigg). Om du ønsker å *kjøre* et instrument, ligger du dårligere an: Carleen Hutchins instrumenter befinner seg stort sett hos noen utvalgte musikere, og hennes egne venner og bekjente. Dessuten er noen kjøpt opp av museer. Musikalska Akademien i Stockholm har et helt konsortium. Men, mange av ideene fra Catgut har bevist sin anvendbarhet også på instrumenter med tradisjonelle mål.

Det er først og fremst den tekniske fremgangen på elektronikkfronten som har muliggjort en slik utvikling. I dag trenger man ikke stort mer utstyr enn en vanlig hjemmecomputer for å bestemme resonansenes plasseringer på frekvenskartet. Ved å tynne veden litt der lokket eller bunnen svinger mest for en særlig resonans-mode kan man tvinge denne frekvensen nedover. Man starter derfor gjerne med litt for tykk ved, og justerer de viktigste resonansene nedover etter et visst system, hele tiden assistert av kontrollmålinger.

### 3.2. Gode instrumenter vibrerer mye (?)

Her kan det være på sin plass å avlive nok et par livskraftige myter: (a) "*På et godt instrument vibrerer alle delene mye, inkludert gripebrett hals og strengholder.*" (b) "*Tykkelsen på materialet avgjør hvor mye det vil vibrere.*"

Kommentar til (a): Alle deler av instrumentet som vibrerer uten å "pumpe luft" tapper strengen for energi uten at det blir lyd av det. Energi som kunne gått til instrumentkroppen og derfra blitt omdannet til lydbølger i luften. Man kan sammenlikne dette med en stemmegaffel med og uten kontakt med en bordflate. *Med* kontakt sørger vibrasjonene i bordflaten for at mye luft settes i bevegelse; en hørbar tone skapes. Uten bordflaten flyttes kun små mengder luft fra én side av stemmegaffelens tenner til den motsatte. Vi hører knapt lyden selv om like mye energi er "forbrukt". Når det gjelder strengholderen, kan vibrasjoner der lett skape wolf-toner dersom den svinger med en uheldig frekvens. Det finnes likevel situasjoner der enkelte av disse "i løse luften"-resonansene kan gi en viss nytte. Det gjelder særlig halsen og gripebrettet: Huden på hendene, og særlig fingertuppene, er følsomme for små svingninger<sup>11</sup> i området 100 til 500 Hz (varierende med personens alder). Om halsen gir vibrasjoner i dette frekvensområdet, kan dette gi en slags tilbakemeldingsfunksjon, og være nyttig for musikeren. Når det gjelder den ytre, frittstående delen av gripebrettet, kan det muligens være en fordel å stemme denne likt med instrumentets laveste luftresonans, som da vil bli noe dempet, men til gjengjeld strekke seg over et noe større frekvensområde (få effekt også for de to tilstøtende tonene).

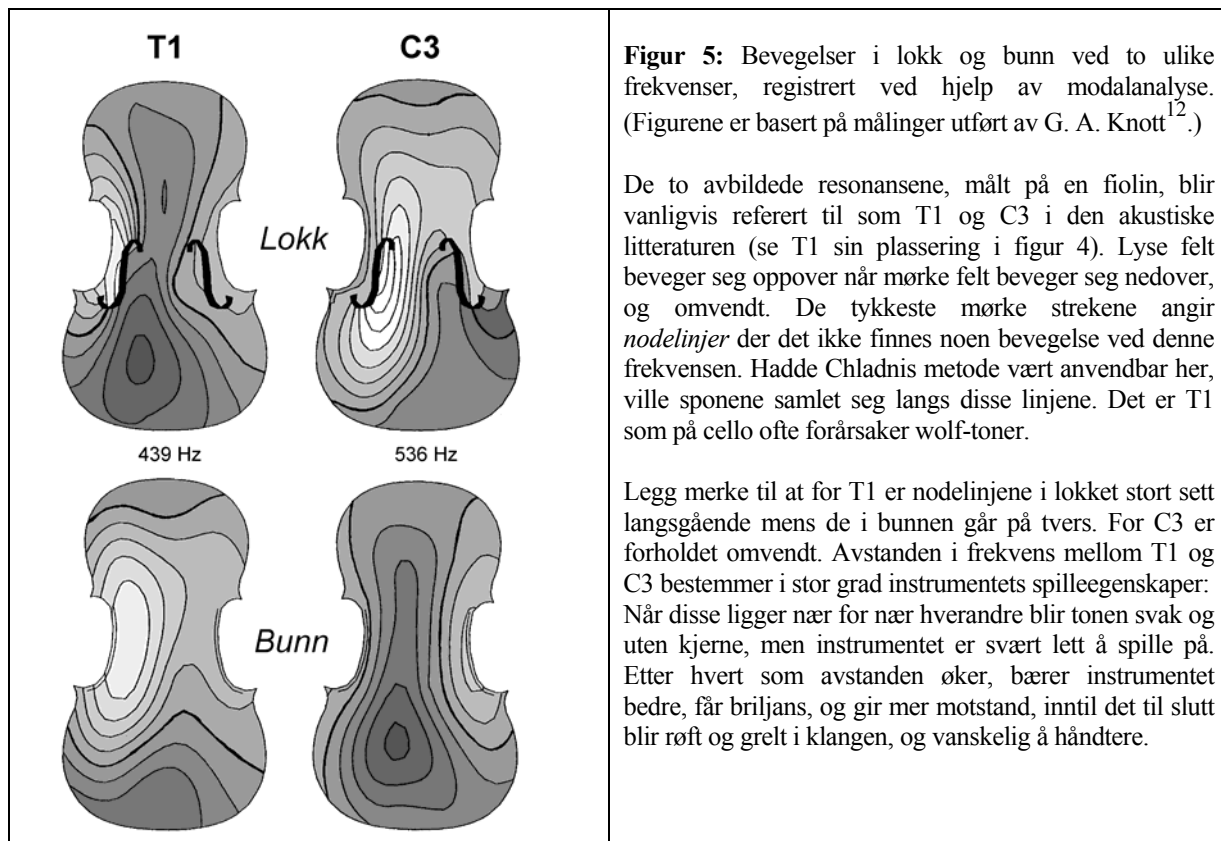
Kommentar til (b): Ved å redusere tykkelsen på den delen man ønsker skal "vibrere mer" oppnår man ikke at dempingen forandres, kun frekvensen. (For en plate av en gitt form og materiale

eksisterer det proporsjonalitet mellom tykkelse og frekvens.) At det i visse tilfeller føles som om vibrasjonene øker, kan skyldes at resonansene kommer inn i et frekvensområde der huden har større følsomhet (den er maksimal ved ca 250 Hz, like i nærheten av fiolinens store luftresonans). Over 7-800 Hz er vibrasjoner knapt merkbare på huden.

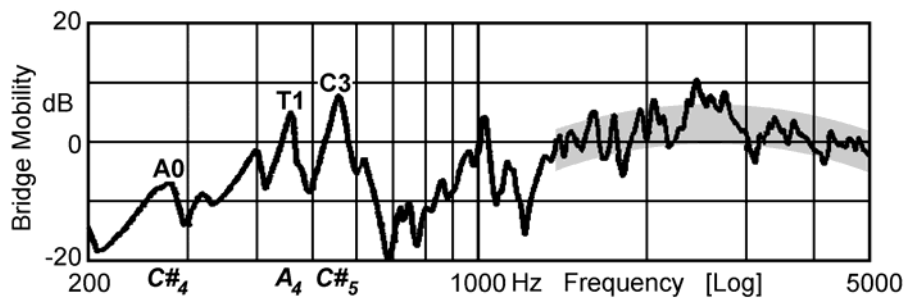
### 3.3. Moderne analysemetoder

#### 3.3.1. Plater og kropp

Når det gjelder avstemming av lokk og bunn før disse er limt sammen til et instrument, benyttes fremdeles med suksess Chladnis 1700-tallsmetode av mange instrumentmakere: Man strør sagspon av en viss størrelse over emnet (glitter er også vanlig benyttet), og setter deretter platen i vibrasjoner ved å sende den ønskede frekvensen gjennom en høyttaler på undersiden av emnet. Sagsponet samler seg langs *node-linjene*, der platen beveger seg minst. Dersom sponet ikke danner linjer der de skal, justeres platetykkelsen. Dessverre er denne metoden lite anvendbar når instrumentet er samlet og lakkert, fordi sponene vil gli av de hvelvede platene. Laserteknikk og holografi (såkalt *holografisk interferometri*) har siden slutten av syttitallet vært nyttige hjelpemidler i kartleggingen av det ferdige instrumentets bevegelser, og har i stor grad bidratt til en omfattende forståelse av hvordan førsteklasses instrumenter fungerer. Men, slikt utstyr er selvsagt for kostbart til praktisk bruk for en instrumentmaker. En relativt enkel metode som kom på åttitallet kalles *modalanalyse*, og er vesentlig mer hendig: Der banker man lett på flaten man ønsker å undersøke med en liten spesialhammer tilkopleet en PC. Kraften registreres. Samtidig måler man bevegelsen med et akselerometer (en slags kontaktmikrofon) et annet sted på platen, også dette tilkopleet PCen. Etter å ha banket med hammeren et visst antall ganger på ulike steder, regner et PCprogram ut hvordan hele objektet beveger seg ved de ulike frekvensene (se figur 5), og man kan avspille bevegelsene på skjermen i langsom kino.







**Figur 6:** Bevegelighetskurve (admittans) for en Stradivarius, målt med et lite hammerslag på stolen (etter Jansson). De laveste luft- og tre-resonansene (merket hhv. A0 og T1) er godt synlige. I tillegg ser man klart en høyere tre-resonans C3. Avstanden mellom T1 og C3 er svært betydningsfull for fiolinens spilleegenskaper. Videre er plasseringen og helningen på det skraverte området avgjørende for instrumentets briljans. Med for tynn plate mellom  $f$ -hullene (under stolen) vipper denne delen av kurven nedover på høyre side, slik at mye av briljansen uteblir. Det samme kan skje om stolens ben står for nær hverandre.

Om man ikke trenger å kartlegge fullstendige bevegelser i lokket eller bunnen, nøyer man seg med ett slag mot stolen med PC-hammeren, og *avleser stolens bevegelse*. Da kan man regne ut et uttrykk for stolens bevegelse, også kalt *admittans*, som betraktet i frekvensplanet (spektrum), forteller svært mye om hele instrumentets klang- og utstrålingsegenskaper (se figur 6). Når man studerer panelene i figur 5 ser man at ulike felter på lokket i stor grad beveger seg uavhengig av hverandre. Ved å måle lydutstrålingen i et ekkofritt rom kan man også observere at ulike frekvenser utstråles i *ulike retninger*, og at denne effekten, som kalles *direktivitet*, enkelte ganger kan være så fremtredende at på et par meters avstand fra instrumentet vil to mikrofoner plassert med litt avstand fra hverandre kunne registrere forskjeller i lydstråling på mer enn 40 desibel<sup>13</sup>!

I et rom med reflekterende vegger, som i en konsertsal, vil denne direkte utstrålingsegenskapen kunne være med på å gi inntrykk av at instrumentet klinger allestedsfra; det "fyller rommet". Det er ikke usannsynlig at denne egenskapen særlig er fremtredende hos førsteklasses instrumenter. Når man måler direktivitet benytter man gjerne en metode som blir referert til som "the reciprocal bow" som i dette tilfellet kanskje best kan oversettes med "bue i motsatt ende". I stedet for å stryke på instrumentets strenger og fange lydbølgene opp med mikrofoner et stykke unna, sender man strengelyd ut gjennom høyttalere fra lytteposisjonen og fanger i stedet opp resultatet gjennom stolens vibrasjoner. Overføringen fra instrumentets stol til lytteposisjon er nemlig identisk lik overføringen fra lytteposisjonen til stolen (ifølge "loven om resiprositet"). Derfor kan man for slike analyser velge retningen på overføringen fritt. Å sammenlikne instrumenter på en objektiv måte er vanligvis et problem fordi musikeren som spiller på det alltid vil prøve å kompensere eventuelle svakheter ved instrumentet. Med "bue i motsatt ende"-metoden kan man f.eks. først gjøre opptak av musikerens strengesignal ved stolen, eller konstruere et slikt – så etter tur, via høyttalere, sende signalet mot et antall fioliner – for til slutt lytte til, og sammenlikne, fyldig, "normal" fiolinklang trukket ut av deres respektive stoler med kontaktmikrofon! Dette sikrer at det virkelig er instrumentet man hører og måler, og ikke dyktigheten til musikeren.

Selvfølgerlig kunne man ha brukt en robot til å stryke på de ulike fiolinene, slik at strøket var likt hver gang. Man benytter faktisk såkalte "strøkmaskiner" i en rekke andre sammenhenger, f.eks. for å teste strenger under utvikling. Slike roboter er imidlertid ikke fullstendig pålitelige; man får

ikke til 100% likt strøk hver gang man stryker på et instrument som under buehårene vibrerer i alle plan. Derfor er ”bue i motsatt ende”-metoden svært nyttig i en rekke sammenhenger.

### **3.3.2. Harpiks, friksjon og streng**

Når det gjelder harpiks, friksjon, og forholdet bue/streng generelt, så er sammenhengen såpass kompleks at det (med dagens metoder) er umulig å utføre analyser basert på direkte målinger. Dette gjelder særlig for ansatser eller andre plutselige forandringer av strøkparameterene (transienter). Heller ikke algebraiske tilnærminger er særlig nyttige for annet enn de mest forenklete systemene. Av denne grunn har *datasimulering* dominert denne forskningen fullstendig siden slutten av syttitallet, da teknikken ble utviklet av en gruppe fra universitetene ved Cambridge (U.K.) og Carnegie Mellon (U.S.A.)<sup>14,15</sup>. I slike datamodeller er det som regel tatt med en rekke faktorer man vanligvis ikke tenker på når man spiller et strykeinstrument; f.eks. at strengen ikke bare følger med buen når man stryker den, men at den også vrir seg og delvis ruller tilbake på buehårene. Dermed skapes et annet sett bølger med helt egne frekvenser. Dette er bl.a. grunnen til at mange løse fiolin E-strenger (særlig de uten overspinning) ”piper” eller ”plystrer” med en høy frekvens om man er litt uforsiktig i ansatsen.

Friksjonsegenskapene til harpiks har vært gjenstand for omfattende undersøkelser de siste årene. Tidligere tenkte man seg at friksjonen sto i direkte forhold til den relative hastigheten mellom buehårene og strengeoverflaten, og at friksjonen minsket når (glide-) hastigheten økte. Nå regner man med at det er harpiksens *temperatur* i og nær kontaktpunktet som bestemmer friksjonen, og at det er *maksimaltemperaturen* som avhenger av den relative hastigheten. Simuleringer med slike temperaturkontrollerte modeller har vist god overensstemmelse med praktiske målinger. Simuleringene viser at kontaktflatetemperaturen skifter lynraskt når buehårene veksler mellom å gripe og slippe strengen. Oppvarmings-/avkjølingstidens lengde har imidlertid betydning for klangen, som blir skarpere eller mer grell jo raskere harpiksen smelter eller myknes. Slik informasjon er nyttig for dem som ønsker å utvikle nye, forbedrede harpikstyper. Simuleringer har også vist hvilke egenskaper hos strengen som gjør den lett å sette an. Dette har ført til at en del strengefabrikanter har konstruert strenger etter helt nye prinsipper. For eksempel er D’Addarios Helicore-serie bygget på denne nye viten.

Strengens transverselle svingninger under buen er enkle å måle dersom den strengen er av metall: Man fester en liten magnet under strengen der man ønsker å stryke (vanligvis festet til en kort stang fra gripebrettet). Da blir strengen strømførende med spenning proporsjonal med utsvingshastigheten, slik at man ganske enkelt kan kople strengeendene til inngangen på en forsterker. (Spenningen ligger i størrelsesorden rundt én millivolt så det er ingen fare for å svi fingrene!)

### **3.3.3. Buen**

Buens klang og spillegenskaper er fremdeles omgitt med en viss mystikk og mange spørsmålstegn, selv om man har oppnådd oversikt over en del egenskaper som må være tilstede for at buen skal være god å spille med. Buemakere tenker seg gjerne at ”buens vibrasjoner overføres til strengen, og kommer ut som hørbar lyd”. Dette er heldigvis (!) bare en myte: Om man ved hjelp av en kontaktmikrofon forsterker opp buens egne vibrasjoner under spill, vil man raskt høre en plagsom glissando, vekselvis opp og ned, i takt med strengens forflytning langs de vibrerende buehårene. Strykeorkester ville ha vært en ulidelig opplevelse på linje med en skog av ustemte hawaiigitarer... Men, i stedet for å overføre energi *til* strengen, stjeler buen små mengder energi *fra* strengen, hvilket ikke får fullt så dramatiske konsekvenser. Likevel er denne energioverføringen en viktig faktor som karakteriserer buens egenklang. Til nå har det ikke vært

mulig å finne ut nøyaktig hva som skiller den ene buen fra den andre klangmessig; man kan f.eks. ikke se forskjeller i spektrum. På den annen side utførte Anders Askenfelt (ved Kungl. Tekniska Högskolan i Stockholm) og undertegnede for noen få år siden en test der erfarne, profesjonelle fiolinister på en overbevisende måte demonstrerte sin evne til å skille klangen av ulike buer fra hverandre i en lyttetest<sup>16</sup>. At ulike buer klinger forskjellig er tydeligvis ingen myte, selv om vi ennå ikke helt forstår hvordan...

At fiolinister kan gjenkjenne ulike buer uten å spille med dem er ingen selvfølge: I en storstilet undersøkelse utført omtrent samtidig av Institut für Wiener Klangstil, (Universität für Musik, Wien), forøkte 110 profesjonelle fløytister å skjelne mellom klangen fra fløyter i syv ulike *metaller* (forsølv, rent sølv, 9, 14 og 24 karat gull, platinabelagt, og ren platina, alle utført som samme Miramatsu modell – og spilt av syv fløytister fra ulike Wiener-orkestre, inkludert Die Philharmonie). Resultatet var nedslående: Det fantes ingen statistisk sammenheng mellom hva musikerne trodde de lyttet til, og det de faktisk hørte. Heller ikke var det målbare forskjeller mellom de respektive metallenes spektrum (totale variasjoner lå innenfor 0.5 desibel for alle frekvenser). Kanskje burde fløytistene være glade: Prisforskjellen mellom dyreste og billigste fløyte ligger på rundt 800 000 kroner! På den annen side er selvfølgelig ikke et slikt resultat noe som øker populariteten til akustikerne, særlig ikke hos dem som har investert langt mer enn en årslønn i bedre klang. Fløytistene som lyttet hadde da også flere innsigelser med hensyn til repertoar, innspillingsforhold, osv. Derfor skal hele eksperimentet gjentas med nytt materiale. Vi venter spent...

### 3.3.4. Stolen

I tillegg til den selvsagte funksjon å holde strengene opp fra instrumentkroppen, virker stolen som en slags transformator. Den gjør om strengens relativt store bevegelser med liten kraft, til små bevegelser med stor kraft. Det siste er nødvendig for å få bevegelse i lokket. På alle strykeinstrumentene har stolen to, tre hovedresonanser. På fiolin finner vi de to laveste av dem rundt 3000 og 6000 Hz. På cello, perfekt tilpasset forskjellen i stemming, rundt 1000 og 2000 Hz. Over den laveste resonansen faller overføringen relativt raskt, inntil den får en liten ”lift” ved neste resonans. Om man justerer den laveste resonansen opp, f.eks. ved å kutte litt av skuldrene øverst på stolen, eller ved å fjerne litt tre øverst i løkkene på hver side, vil klangen bli skarpere, men kanskje også litt grell. Er det for mye ved der oppe, flyttes resonansene nedover, og klangen blir mørkere. Det er dette som skjer når man setter på en sordin. Eksempelvis vil en fiolinsordin på 1.5 gram omtrent halvere de to viktigste stol-resonansene, dvs flytte dem ca en oktav ned. Stolen er altså instrumentets diskantfilter, som innstilles ved hjelp av den laveste resonansen.

For analyser av stolen bevegelser benyttes både holografisk interferometri og *Finite Element Metoden* (FEM). Den siste kan regne ut hva som skjer med vibrasjonene og resonansene dersom vi forandrer litt på stolens utseende. De som ønsker mer informasjon om dette kan lese Rodgers og Masino sin artikkel<sup>17</sup> fra 1990. FEM er samme teknikk som bl.a. brukes for å bedømme materialstabilitet på boreplattformer. Med moderne varianter av metoden kan man angi hvilke resonanser man ønsker en konstruksjon skal ha, gi det ett omtrentlig omriss, så vil et dataprogram kunne regne ut nøyaktig form og tykkelser på materialer, etc. Dette er et meget spennende perspektiv, ettersom man i fremtiden bedre vil kunne kompensere for mangler i materialets kvalitet, uten å kompromisere så mye med klangen. Førsteklasses materialer blir det som kjent stadig vanskeligere å få tak i. Blant andre jobber Kungl. Tekniska Högskolan i Stockholm med denne problematikken både når det gjelder kropp og bue til strykeinstrumenter<sup>18</sup>.

## 4. Hva vet vi om buestrøk og klangbehandling?

### 4.1. Ansatsstøy

Under ”normale forhold” prøver musikeren å oppnå Helmholtzbevegelse i strengen så raskt som mulig. (Som eksempel på situasjoner der Helmholtzbevegelsen *ikke* er ønskelig, kan nevnes *ponticello*, der strengen glipper mer enn én gang per periode. Dette fører til at strengen får flere

enn ett roterende hjørne, og at klangen blir ”glassaktig”.) Sammen med Askenfelt gjorde undertegnede i 1996 en omfattende undersøkelse av hvor lang oppbygningstid som aksepteres av strykere<sup>19</sup>. Her skal man være klar over at før Helmholtzbevegelsen kommer i gang, vil tonen domineres av en eller annen form for ”støy”: Går buen alt for langsomt eller har for stort trykk vil strengen ”knirke” eller ”lyde hest” på grunn av for lang avstand mellom strengglippene. Går buen for fort eller har for lavt trykk vil strengen glippe for ofte – gjerne uregelmessig – og klangen minne om ponticello. Dersom ansatsen skulle kunne kategoriseres som ”akseptabel” og ”musikalsk nøytral” som i en skalaøvelse, fant vi at Helmholtzbevegelsen ikke kunne utsettes lenger enn henholdsvis 50 og 90 millisekunder (= 1/20 og 1/11 sekund). Man var altså noe mer tolerant for ekstraglipp enn for knirk. Men, som vi skal se: Hver til sin tid.

I denne testen, hvor 20 strykere fra Norges musikkhøgskole deltok som dommere, hørte panelet på opptak av fiolinansatser spilt av ”robot” under kontrollerte forhold. Vi ønsket i tillegg å teste hvordan profesjonelle fiolinister utførte tilsvarende ansatser, og inviterte to erfarne musikere fra Stockholmsfilharmonien. Disse fikk ikke vite hva vi ønsket å undersøke; de fikk bare angitt hva de skulle spille. Konklusjonen var ganske klar: Av de 1694 ansatsene som ble analysert kunne ca halvparten karakteriseres som ”perfekte” i den forstand at Helmholtzbevegelsen ble startet direkte, uten støy eller forsinkelse av noen art. Når det gjaldt de resterende, hadde det stor betydning i hvilken musikalsk sammenheng de inngikk. F.eks. startet nesten alle tonene i et utdrag fra Bizets ”L’Arlésienne”-suite med forlenget avstand mellom strengglippene (”knirk”), hvilket som regel skjer når man spiller *martelé*. I et utdrag fra Bachs Preludium nr. 5 fra Das Wohltemperierte Klavier (détaché sekstendeler spilt *mezzo piano* med lette strøk) hadde nesten alle tonene lang innsvingningstid med mange ekstra glipp. Litt ”oppå strengen”, om man vil. Dette viste med all tydelighet at fiolinistene hadde god kontroll og var i stand til å velge ansatstype med god presisjon ut fra den musikalske sammenhengen.

*Men dette forbauser vel ingen musikere? Hvorfor i all verden skulle man behøve å forske på noe slikt?*

Et viktig aspekt er den rene nysgjerrigheten; muligheten til å få vite hva som *egentlig* foregår. Som allerede flere eksempler har vist, er ikke alltid musikerne de rette til å forklare hva som virkelig skjer under hendene deres selv om de utvilsomt står nærmest selve fenomenet. Om man ønsker å konstruere en streng som ”svarer lett”, dvs lett kommer inn i ønsket bevegelsesmønster – og ikke bare vil ”gjette og prøve seg fram” – må man for det første vite hvordan dette mønsteret ser ut, dernest vite hvilke avvik som er akseptable/uakseptable. Dette er også viktig informasjon med hensyn til *instrumentets* spilleegenskaper, der eksempelvis stolens bevegelighet er helt avgjørende for hvilke mønstre som dannes. Hvilke resonanser i stolen/instrumentet kan lage trøbbel? Hvilke egenskaper gjør instrumentet behagelig å spille på? At førsteklases instrumenter både klinger godt og er gode å spille på er selvsagt. Men hva med dem som har god klang men er upålitelige eller vanskelige å håndtere? Kanskje gir forskningen svar på hva som bør forandres så snart sammenhengen er avdekket? Da vår studie om ”akseptabel transientstøy for Helmholtzbevegelse” ble vurdert av det amerikanske fagtidsskriftet som senere publiserte artikkelen, ble vår informasjon også sett som viktig i forbindelse med syntesisering av strykeklang. Om syntesisering kan man mene hva man vil, *men* – uansett lydkilde: Klangen skal vel være så bra som mulig?

## 4.2. Hvordan lager man en "renslig" ansats?

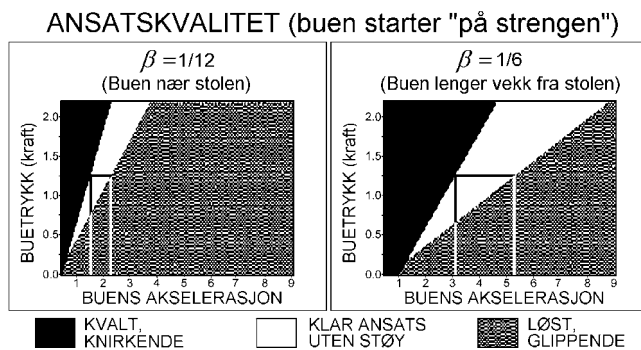
I prinsippet har en stryker tre muligheter når han/hun skal sette an en tone:

- (1) Starte buen "fra luften" – fra null trykk, men med en viss hastighet.
- (2) Starte buen "på strengen" – med et visst trykk, men fra null hastighet.
- (3) Starte buen fra null trykk og null hastighet.

Det er fysisk umulig å starte med både fullt trykk og full hastighet samtidig.

Som utøvende stryker gjennom mange år har jeg ikke kunnet unngå å legge merke til at fiolinister ofte benytter metode (1) når de skal starte en syngende frase, mens deres kolleger på cello og bass oftere har kontakt med strengen når frasens første tonen startes, selv om ansatsen skal være myk. Grunnen til dette ligger sannsynligvis i det faktum at transienttiden er lengre på de dypere instrumentene (den er omvendt proporsjonal med frekvensen), hvilket innebærer at eventuell ansatsstøy vil være vesentlig lenger, og dermed være mer hørbar og forstyrrende på de dype instrumentene. Imidlertid er alle strykere henvist til metode (1) når de skal veksle fra én streng til en annen i legato. Av den grunn pleier erfarne cellister og kontrabassistene gjerne å utføre en slik strengveksling såpass langsomt at støyen (ekstraglippene) som ubønhørlig opptrer i det den "nye" strengen blir satt an, blir dekket (masket) av den utdøende klangen fra forrige streng. Da får man myke og "støyfrie" overganger mellom tonene som skal bindes sammen.

Kraftigere ansatser blir gjerne utført med metode (2), også på de mindre strykeinstrumentene, og da særlig om ansatsen skal utføres nær stolen. I slike tilfeller er det visse fysiske regler som gjelder med hensyn til om ansatsen skal bli "renslig" eller ikke. I figur 3 viste vi hvordan strengen svinger med ett roterende hjørne når buen har godt tak i strengen. Hvordan dette mønsteret kommer gang har vært et mysterium siden Hermann von Helmholtz påviste bevegelsen for mer enn 140 år siden. Min egen doktoravhandling<sup>20</sup> påviser hva som kreves av musikeren for at mønsteret skal dannes, og hvordan det roterende hjørnet oppstår.



**Figur 7:** Krav til buens akselerasjon i ansatsen ved to ulike strøkposisjoner (skjematisk, med tilfeldig valgte enheter).  $\beta$  angir buens avstanden fra stolen relativt hele den svingende strengelengden. Jo større buetrykket er, dess større akselerasjon kreves om "knirk" skal unngås. Samtidig øker mulighetene for å velge akselerasjon (se tekst).

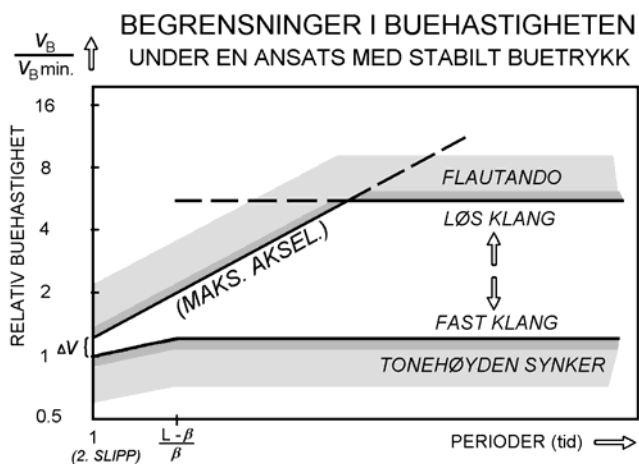
Figur 7 viser ansatskravene i forenklet, skjematisk form. (Praktiske målinger utført ved University of Cambridge har senere bekreftet hovedtrekkene i disse<sup>21</sup>.) Langs den horisontale aksene (abscissen) øker bueakselerasjonen fra venstre mot høyre. På den vertikale aksene (ordinatet) er buetrykket (dvs. buens kraft mot strengen) angitt. Med riktig kombinasjon av buetrykk og -akselerasjon vil man treffe et sted inne i det hvite triangellet, og ansatsen bli "ren" fordi strengen slipper buehårene periodisk fra første stund. Beholder vi samme buetrykk og velger en lavere akselerasjon, vil vi kunne komme over i det svarte feltet, der strengen blir "kvalt" og begynner å "knirke". Tilsvarende vil strengen "glippe" dersom akselerasjonen er for stor. Om vi starter strøket med et høyere trykk, ser vi at det blir større slingringsmonn for akselerasjonen. (I figurene er det inntegnet rektangler som indikerer "akseptabelt akselerasjonsområde" for et valgt buetrykk. Økes buetrykket blir rektanget høyere og bredere,

og akselerasjonsområdet dermed større.) Legg også merke til at det finnes et minimumstrykk, under hvilket Helmholtzbevegelsen ikke kan startes direkte. Figur 7 viser to paneler med hver sin bueposisjon ( $\beta$  angir buens *relative posisjon*, dvs lik buens avstand til stolen dividert på den svingende strengelengden). På det venstre panelet er buen nærmest stolen. Her ser vi at det hvite trianlet angir lavere akselerasjon, og det er smalere og gir mindre slingsingsmonn enn om buen hadde vært lenger unna (som i det høyre panelet).

Som nevnt var våre fiolinister svært dyktige på å treffe i de hvite trianglene. Om de hadde truffet med 100% sikkerhet, ville klangen antakelig ha miste mye av sin sjarm og spesielle ”strykerkarakter”. For et par år siden ba en av forskerne ved KTH meg spille en rekke toner på kontrabass, som så skulle samples enkeltvis. Jeg spilte en kromatisk skala, der jeg passet på at alle tonene var ”perfekte” – uten støy av noen art. Når han senere satte tonene sammen til melodier låt det akkurat som en – ja, synthesizer!

I ansatsen er det altså buens posisjon, trykk, og *akselerasjon* som bestemmer hvor raskt og rent tonen skal startes<sup>22</sup>. Marginene er relativt små, noe alle nybegynnere får merke. Videre kompliseres bildet av at man for å være sikker på å lage en renslig ansats må forandre akselerasjonen i forhold til hvilken tone man spiller. For eksempel bør den økes/minskes omtrent proporsjonalt med frekvensen dersom man spiller et intervall på samme streng. Ved to ansatser med en oktavs mellomrom bør altså den høyeste tonen gis dobbelt så stor akselerasjon. Videre: Tyngre strenger krever lavere akselerasjon. Om man f.eks. sammenlikner to D-strenger med ulik vekt og spenning, så bør buens akselerasjon ideelt sett være omvendt proporsjonal med deres vekt. Dessuten spiller instrumentets resonanser en rolle; det samme gjør strengens indre friksjon (damping)... Dette blir mye å tenke på på en gang. Alt for mye! Og den som virkelig vil prøve å tenke slik er nærmest dømt til å mislykkes! På den annen side: Om man *allerede har mislykkes*, eller ønsker å forbedre klangen på en gruppe toner man ikke er fornøyd med, så kan denne type viten være en god veileder under øvingen. Kjennskap til disse prinsippene er også nyttig i undervisningsøyemed.

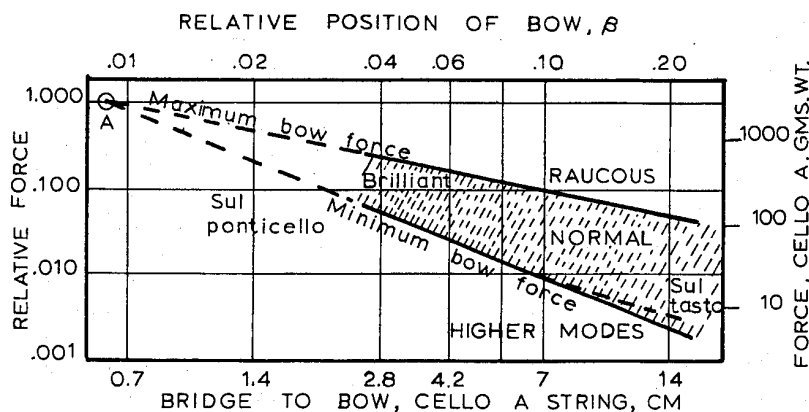
På en kontrabass er en svært utbredt feil at strøket settes i gang for raskt, dvs med for stor akselerasjon i forhold til trykket. Støyen (skrapelyden) som så kommer, prøver man kanskje i neste omgang å forhindre ved å legge på mye mer harpiks. Mye harpiks på buen har lett for å gå ut over intonasjonen, spesielt i høyden, og det gir en mer ufri klang i hele registret. Det hadde vært bedre om man hadde satt i gang strengen med korrekt akselerasjon i utgangspunktet. På fiolin er innsvingningstiden såpass kort at ansatsstøy spiller en vesentlig mindre rolle (selv om transienttiden er mye lenger enn på f.eks. en obo eller en trompet). Likevel er det mange situasjoner der også fiolinistene må passe ekstra godt på. F.eks. om man forsøker å sette an en tone helt nær stolen. Da må akselerasjonen i tillegg til å være lav, også være helt jevn dersom et ufrivillig ”ponticello” skal unngås. Jevn akselerasjon kan i praksis oppnås ved at man avstiver handleddet noe i det ansatsen uføres. Noen husker kanskje fra skolen Newtons andre lov: Kraft = masse  $\times$  akselerasjon. Når strengen glipper første gang slik at tonen starter, vil friksjonskraften og dermed strengens motstand plutselig synke, for deretter å variere både raskt og mye. (Buen har lett for å fly ukontrollert fremover.) Om akselerasjonen skal hindres i å variere tilsvarende mye må massen, i dette tilfellet buen + hånden + armen, være såpass stor at variasjonene i akselerasjon blir holdt på et akseptabelt nivå (akselerasjon = kraft/masse). Om fingrene og handleddet i et slikt tilfelle er for fjærende, vil armens masse være ”frakoplet” slik at det stort sett er buen alene som utgjør den kontrollerende massen (ca 60 gram). Dette er ting enhver stryker burde eksperimentere med for å danne seg et bilde av hva som kreves i de ulike situasjonene. Så fort man har fått startet strengen på en korrekt måte øker toleransen for buehastighet og akselerasjon. Figur 8 beskriver omtrent hva som skjer:



**Figur 8:** I løpet av ansatsen får musikeren stadig mer valgfrihet med hensyn til buehastighet, og dermed valg av klangfarge.  $\Delta V$  angir det hastighetsområdet som gir klar ansats direkte. Jo lenger unna stolen buen er plassert, jo større er  $\Delta V$ .

### 4.3. Etter ansatsen, den utholdte tonen

Mens posisjon, trykk og akselerasjon var nøkkelordene i ansatsen, er buens posisjon, trykk og hastighet nøkkelord for den utholdte tonen. Basert på Ramans bølgeanalyser beregnet Catgut-gruppens cellist, John Schelleng, hvilke krav Helmholtzbevegelsen stilte til strøket under "steady state" (stabil tilstand). Han kom fram til følgende diagram<sup>23</sup> (se figur 9), som også stemte godt med målinger han hadde utført på sin egen cello. Her viser den vertikale aksene buetrykket (force), *relativt til nødvendig buetrykk* (dvs kraft) for å spille helt nær stolen med en gitt buehastighet:



**Figur 9:** Diagram som viser forholdet mellom buetrykk (force) og posisjon for en gitt buehastighet (ref. 23). Høyere trykk kreves etterhvert som avstanden til stolen blir kortere. Det er overraskende nok denne trykkforandringen som forandrer klangen. Ikke i seg selv buens posisjon på strengen!

Her er *maksimums*-buestrykket omtrent omvendt proporsjonal med avstanden til stolen: Om man spiller nær stolen og gradvis flytter buen til et punkt dobbelt så lang unna, må man også gradvis (minst) halvere buetrykket. Ligger man på minimumslinjen kan man senke buetrykket til en fjerdedel hver gang man doubler avstanden. Det diagrammet viser med all tydelighet, er at toleransen snevres inn når man nærmer seg stolen, og om man ønsker beholde buens hastighet, tvinges buetrykket opp. I praksis vil man gjerne forandre buehastigheten også – senke den litt etterhvert som man nærmer seg stolen. Dette virker i motsatt retning, hvilket betyr at man ikke trenger øke buetrykket fullt så mye.

Som en grov tommelregel kan det utledes at *buehastighet* på den ene siden, skal "balansere" mot *frekvens*, *buestrykk* og *avstand fra stolen* på den andre siden. Økes buehastigheten må minst én av de andre tre også økes dersom vi ønsker å opprettholde klangen. Øker vi frekvensen har vi valget mellom enten å minske buetrykket eller avstanden til stolen – eller å øke buehastigheten.

Selvsagt kan vi også velge en kombinasjon av disse tre. Ved dobbeltgrep med store intervaller bør den nederste tonen få det største buetrykket – uansett hvilken streng den spilles på – dersom klangen og intonasjonen skal bli best mulig. Man hører dessverre ofte strykere (også profesjonelle!) som presser for mye på øverste tone i dobbeltgrep, bare fordi denne er melodibærende.

#### 4.4. Klangbehandling

Schellengs diagram har inntegnet noen klanguttrykk: ”Raucous” (hes, grov), ”Brilliant” (lysende, strålende, briljant), ”Ponticello” og ”Sul tasto”. Dessuten benytter han betegnelsen ”higher modes”, hvilket betyr at strengen glipper på buen slik at grunntonen undertrykkes. I sin JASA-artikkel, der diagrammet er tatt fra, demonstrerer han hvorledes Helmholtz-hjørnet, og dermed klangen, blir rundet av slik at klangen blir bløtere når buetrykket senkes (jfr min figur 3). Strykeinstrumenter er ganske unike når det gjelder å kunne forandre klangfarge raskt og enkelt. I de følgende avsnittene vil jeg omtale noen de av kontrollmulighetene buen gir.

##### 4.4.1. Buetrykket

Som allerede nevnt påvirker buetrykket klangfargen på den måten at tonen blir skarpere når buetrykket økes (alle andre parametere holdt konstant). Hvor stor forandringen blir, beror både på valg av harpiks og på type streng. Norman Pickering, som har konstruert D’Addario-Helicore strengene, har gjort målinger på fiolinstrenger med ulike kjernetyper<sup>24</sup>. Det som er helt klart, er at enhver streng har et sensitivt buetrykks-område der klangen lett påvirkes av selv små forandringer i buetrykket. Utenfor dette området forandrer ikke klangen seg like raskt. Det følsomme området ligger generelt høyere for high-gauge (kraftige) strenger enn for lettere strenger. Den strengen Pickering målte til å være den mest følsomme for buetrykk, var en light-gauge A-streng med aluminium overspining og Perlon kjerne. Ved å øke buetrykket fra 20 til 60 gram (-kraft), dvs 3 ganger, steg amplituden på alle overtoner to til fire oktaver over grunntonen ca 6 ganger (mer enn 15 dB)! Likevel var det strenger med stålkjerne som generelt ga de størst klangforskjellene (og dessuten kraftigst tone). Tarmstrenger kom på sisteplass, med syntetiske polymerkjerne midt i mellom. Teoretisk skal en økning av buetrykket fra minimum til maksimum kunne forandre den totale lydstyrken ca 1 til 2 desibel (12 til 26%), hvilket tilsvarer forskjellen mellom grunntonen hhv. uten og med fullstendig overtoneserie. En slik økning av overtonenes andel vil imidlertid oppleves som en *betydelig økning i lydnivået*, fordi skarpe toner generelt oppleves som sterkere enn bløte toner, selv når det objektive lydnivået er uforandret.

##### 4.4.2. Buehastigheten

Også buehastigheten spiller en vesentlig rolle for klangspektret<sup>25</sup>. Med rask bue blir klangen bløtere, Helmholtzhjørnet blir avrundet, og de øverste overtonene *svakere – relativt sett*. Men: Med raskere bue blir tonen *totalt sett sterkere*, fordi grunntonens amplitude vil være tilnærmet proporsjonal med buehastigheten om man ikke flytter buen, og vanligvis er grunntonen vesentlig sterkere enn de høye deltonene som svekkes. Om man ønsker å lage diminuendo med mest mulig uforandret klang skal man ikke bare lette buetrykket, men også sakne farten på buen, slik at overtonene ikke forsvinner. Dette er særdeles merkbart på kontrabass, hvor en serie raske diminuendi lett fører til ”romling” (nærmest som et grumset ekko) om man ikke retarderer buen. Grunnen til at en langsom bue gir mer diskant, er at friksjonskraften øker, noe man faktisk kan kjenne om man stryker riktig langsomt.

Anders Askenfelt konstruerte på 80-tallet en fiolinbue der buetrykk, og posisjoner på hår og streng kunne registreres under vanlig spill. Når fiolinistene, mens de spilte détaché fjerdedeler,



gikk fra *pp* til *ff*, flyttet de typisk buen til halve distansen fra stolen, firedoblet buetrykket, mens buehastigheten gikk litt opp eller ned, etter som hvem som spilte<sup>26</sup>.

#### 4.4.3. *Buens posisjon*

Med fare for å få mange strykere mot meg vil jeg si følgende: Det finnes ikke noe grunnlag for å hevde at klangen blir skarpere dersom buen bringes nærmere stolen – om man holder buehastighet og -trykk uforandret. Betrakter man Schellengs diagram (figur 9) ser man imidlertid at man ganske raskt blir tvunget til å *øke buetrykket*, hvis man ikke vil *senke buehastigheten* for å unngå at tonen blir mye sterkere. Det er disse siste to parameterforandringene som forandrer klangen – begge gjør den skarpere – ikke posisjonen i seg selv. I pizzicato er forholdet annerledes. Der blir klangen merkbart skarpere når man utfører det samme pizzicatoet nær en av strengene. Med kjennskap til hvordan strengen beveger seg under buen går det an å regne på disse tingene, og både den matematiske analysen og simuleringer viser et spektrum som ikke endrer profil med hensyn til overtonenes energi når man kun lar buen skifte posisjon.

#### 4.4.4. *Buehårenes helning*

Fiolinister og bratsjister holder nesten alltid buen med helning slik at buehårene nærmest gripebrettet får størst trykk, og hårene nærmest stolen minst. Cellister og kontrabassistene holder av og til buehårene flatt på strengen, men vinkler på samme måte som fiolinistene når de holder buen skrått. Vi var interessert i å finne ut om dette hadde noen betydning for klangen, og utførte derfor en serie forsøk med ”roboten” på Kungl. Tekniska Högskolan i Stockholm. Fiolinbue og fiolin ble benyttet, fordi vi regnet med at effekten ville være mest hørbar og målbar der. (På løse strenger dekker hårene på en flat fiolinbue ca 2,4% av strengelengden, mens de på en kontrabass prosentvis bare dekker litt over halvparten så mye. Man kan tenke seg at en virkelig bred bue ville gitt temmelig ullen klang.)

Resultatene er publisert i proceedings<sup>27</sup> fra SMAC’03 – et symposium for musikkakustikk som hvert tiende år holdes i Stockholm. Vi prøvde både flat bue med ulike hårbredder (ved å holde noen av hårene opp med kiler, slik at ikke alle berørte strengen), og normal hårbredde (8 mm) med en hårvinkel på ca 45°. Både smalere hår og helningen gav merkbare – i alle fall *målbar* – forskjeller i klangen. Størst forskjell noterte vi når buen ble ført svært nær stolen. Videre fant vi at vinkling av buen ga bedre briljans enn tilsvarende reduksjon av hårbredden alene. Men det viktigste var at vinklede buehår ga vesentlig bedre ansatser (kortere transienter) nær stolen. På fiolin og bratsj er dessuten vinklede hår i praksis nødvendig for kunne sette buen varsomt ned på strengen når ansatsen skal være myk. Pitteroff har undersøkt kontaktmekanismen mellom buehår og streng<sup>28</sup>, og viser hvordan det oppstår mer støy når buen ligger flatt, for ikke å snakke om når hårene vinkles den gale veien.

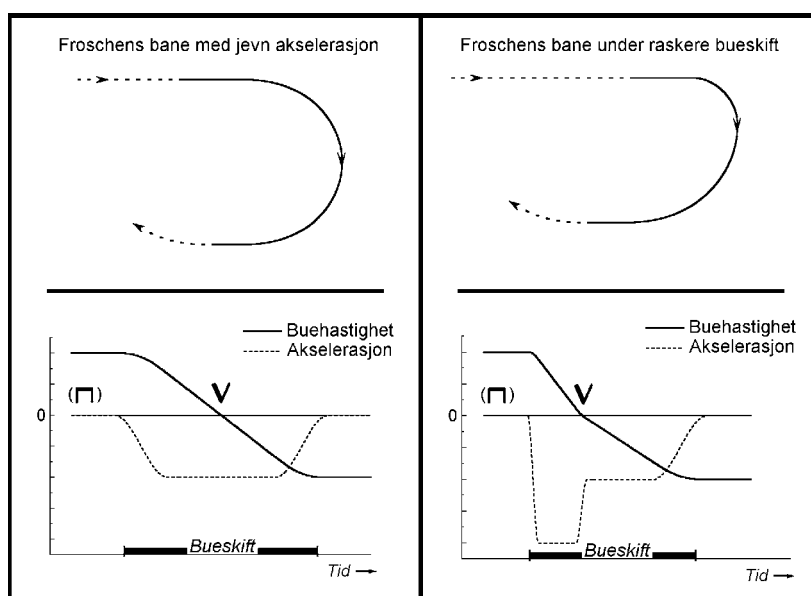
#### 4.5. *Bueskift og ansatser nær stolen*

Alle gode strykere har brukt betydelige tid på å øve myke, ”uhørlige” bueskift. Hensikten er å få snudd buen så raskt, men likevel så mykt, at selve bueskiftet ikke blir hørbart for tilhøreren. Det finnes ulike teknikker for å oppnå dette. Problemet består i at når strøkretningen snus må også Helmholtzrotasjonen snus. Det går ikke an å bruke det ”gamle” strengemønsteret videre ved å ”friske det opp” når buen er snudd. Det er *et nytt mønster* som skal skapes. Om det finnes noe igjen av det gamle mønsteret når buen begynner i sin nye retning, vil dette kun skape problemer, fordi man plutselig vil få to hjørner på strengen, som begge vil trigge hvert sitt slipp, og det betyr støy. Man må altså først dempe det gamle signalet ved å *retardere* buen (gi den negativ akselerasjon). Deretter skal buen akselereres i den nye retningen (som er også negativ i

forhold til den gamle). Det er særlig viktig at akselerasjonen er helt jevn i starten på det nye strøket. Det finnes flere måter å sikre dette på (vi har allerede nevnt avstiving av håndleddet som én mulighet): Det enkleste er imidlertid å la froschen beskrive en liten halvsirkel akkurat i selve skiftet (se figur 10 venstre panel, øverst). Da kan froschen beholde sin hastighet uforandret hele tiden (selv om den forandrer retning underveis), slik at man unngår noe stopp eller rykk i buen. Som man ser i panelet under, vil hastigheten gå helt jevnt over fra positiv verdi (nedstrøk) til negativ (oppstrøk). Akselerasjonen vil være jevnt negativ under hele denne prosessen, noe som er vanskeligere å få til dersom man kun stryker rett fram og tilbake.

Imidlertid viser både simuleringer, og målinger av dyktige strykere, at i de raskeste og mest uhørlige bueskiftene er retardasjonen (dempingen av det "gamle" strengemønstret) vesentlig større enn den påfølgende akselerasjonen i ny strøkretning. Dette akselerasjonsmønsteret kan lett oppnås ved å forandre litt på halvsirkelen, slik at den likner mer på figuren i høyre panel. Med denne banen bruker man kortere tid på dempingen, uten å forandre noe på den etterfølgende ansatsen. Slike bevegelser kan enten utføres som langtrukne åttetall, eller "ovaler" over hele strøket; og de kan utføres vertikalt eller horisontalt (i plan med instrumentkroppen). Poenget er i alle tilfeller å snu bueretningen jevnt og sikkert mens froschen er i uopphørlig, jevn bevegelse. (I parentes skal det også bemerkes at om bevegelsen utføres vertikalt på fiolin eller bratsj, kan man oppnå noe av samme effekt ved å la *håndleddet*, heller enn froschen, beskrive en oval, i retning mot klokken. Men da må man være ekstra påpasselig så ikke buetrykket endres!)

Liknende teknikker kan benyttes ved ansatser nær stolen, men da må strøket startes der det lille pilhodet i figur 10, øverste panel, peker rett nedover. Disse åttetalls-teknikkene har vært anbefalt av en rekke kjente fiolinister og pedagoger opp gjennom historien<sup>29</sup>, men det gjør det jo ikke mindre interessant å analysere hvordan og hvorfor de faktisk virker.

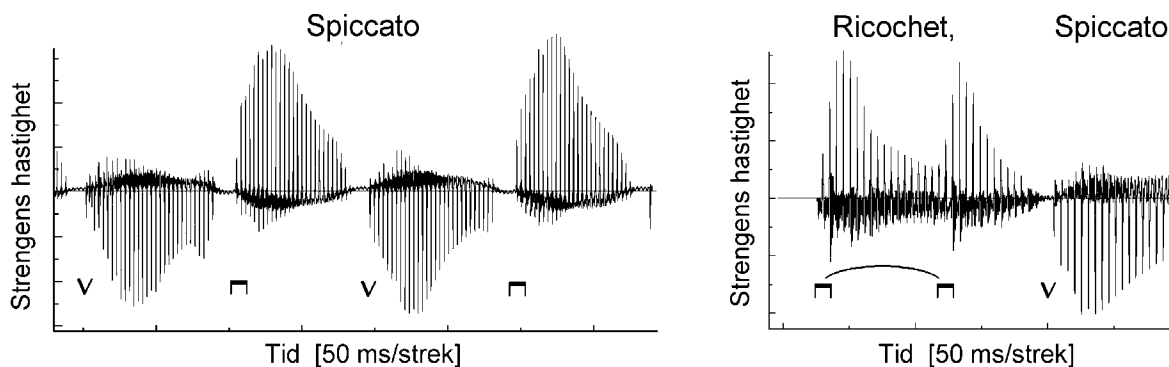


**Figur 10:** To strategier for "uhørlige bueskift". Ved å la froschen beskrive et liggende åttetall (kun høyre løkke vist her) kan strøket snus uten at froschen trenger å stoppe. Er løkken på åttetallet halvsirkelformet, som i øverste panel til venstre, sikres jevn akselerasjon mens buen snus. Et enda mer effektivt skift kan imidlertid oppnås ved å følge banen angitt i høyre panel, der buen bremses ned raskere enn den akselererer i begynnelsen av oppstrøket. I begge tilfellene følger froschen den angitte banen med konstant hastighet. (Også buetrykket bør holdes konstant.)

#### 4.6. Spiccato og ricochet – En metodebeskrivelse

En vesentlig forskjell på spiccato og ricochet er at i spiccato må strengen dempes mellom hver ansats, mens i ricochet kan Helmholtz-rotasjonen friskes opp uten forutgående demping. Figur 11 viser i venstre panel en serie med klare, rene spiccato-toner utført på fiolin. Strengens hastighet under buen er målt med magnet som beskrevet i avsnitt 3.3.2. Hver "spiker" som i

figuren står *ned* på oppstrøkene og *opp* på nedstrøkene, viser at strengen glipper tilbake på buehårene. Vi ser at strengen blir spilt vekselvis med oppstrøk og nedstrøk, og at glippene kommer jevnt og periodisk med unntak av den første tonen der enkelte små ekstraglipp forekommer. I det høyre panelet vises to ricochetstrøk etterfulgt av et spiccato oppstrøk. Legg merke til at der buen skal skifte retning er strengen på forhand perfekt dempet før hver ansats. I ricochet derimot, finner ingen demping sted mellom de to nedstrøkene; tonen friskes raskt opp når buen treffer strengen på nytt i samme retning.



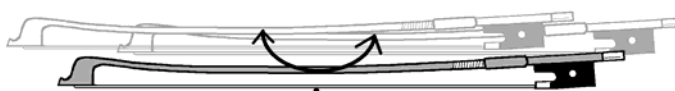
**Figur 11:** Strengens hastighet under buen når det spilles spiccato og ricochet. Hver ”spiker” indikerer et glipp tilbake langs buehårene. Kommer disse glippene regelmessig, med jevne mellomrom helt fra ansatsen, bygges tonen raskt opp med fyldig klang. I ricochet, der buen går i én retning, kan man lett friske opp ”restene” fra forrige tone. I spiccato må strengen dempes før en ny ansats kan bygges opp.

Spiccato er et problem for mange strykere, særlig på de større instrumentene. Dessuten er det store forskjeller i buenes kvaliteter når det gjelder disse strøkartene, hvor buen spretter av strengen mellom hver tone. Derfor ønsket Askenfelt og undertegnede å undersøke hvilke betingelser som må oppfylles for at en spiccato skal bli vellykket i den forstand at ”buen biter godt i strengen” og at det produseres minimalt med ansatsstøy. Disse undersøkelsene er gode eksempler på arbeidsmetoder som benyttes i forbindelse med bue/streng-problematikken: (1) Vi trengte å vite noe om friksjonskraften, men ettersom det er umulig å måle eller ”rekonstruere” denne under slike spilleforhold, brukte vi vårt dataprogram til å *simulere* strøk, tilsvarende dem vi hadde målt – gode og dårlige, slik at vi kunne hente ut friksjonsdata derfra. (2) Vi lagde også et enkelt oppsett med en maskin som ved hjelp av to ”fingre” kunne drive buen med spiccato-bevegelser, rett opp og ned på en kraftsensor, slik at vi kunne lære noe om ved hvilke tempi (frekvenser) spiccato lot seg utføre under ulike forhold, med ulike buer, og hvorledes kraften mot ”strengen” forandret seg periodisk.

Før jeg går inn på resultatene, vil jeg vise en illustrasjon som er tegnet etter en figur i en amerikansk lærebok for kontrabassister. Jeg kjenner forfatteren, og vet at han kan utføre et aldeles utmerket spiccato, men likevel ble hans illustrasjon fullstendig misvisende. Dessverre er han på ingen måte alene om disse misoppfatningene (se min ”rekonstruksjon” i figur 12):

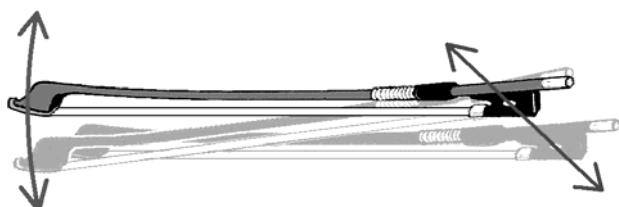
### ”Spiccato”

*Finn minst to feil!*



**Figur 12:** Spiccato slik det *ikke* skal utføres! Bilde er en rekonstruksjon fra en amerikansk lærebok. Buen beskriver en **U** hver gang den kastes mot strengen. Dette vil bli et støyende og ujevnt spiccato.

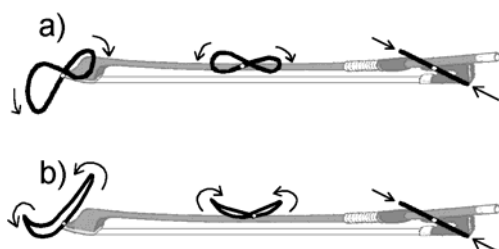
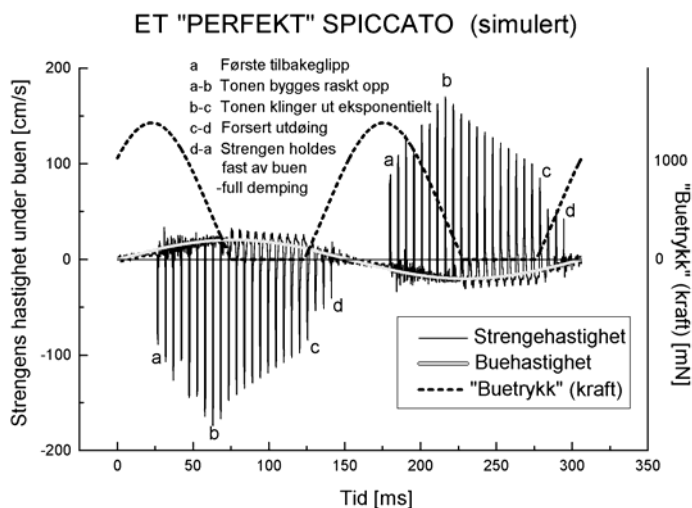
Den første feilen på figur 12 er at buen ikke har noen *rotasjon*. Dersom vi skal kunne benytte oss av buens spiccatoegenskaper må vi la buen få rotere rundt en "akse" et sted nær høyre hånds tommel på froschen. I figuren parallellforskyves hele buen uten rotasjon. En viss parallellforskyvning skal imidlertid finne sted, men den går ikke i retning slik som antydnet på figur 12. Derimot viser figur 13 hvilke to bevegelser buen i prinsippet skal utføre. Samtidig med at den roterer rundt tommelen, parallellforskyves den diagonalt:



**Figur 13:** En korrekt spiccato-bevegelse kombinerer *rotasjon* (rundt froschen) med *translasjon* (parallellforskyvning) diagonalt.

Disse to bevegelsene kan utføres uavhengige av hverandre, og "timingene" (faseforholdet) mellom dem er helt avgjørende for ansatskvaliteten. Dette kunne vi lett sjekke ved hjelp av simuleringsprogrammet<sup>30</sup>. For hver syklus (nedstrøk-oppstrøk) har buen to fullstendige rotasjonsbevegelser (2 × spissen ned-opp), mens det har én translasjonsbevegelse. Ved å starte rotasjonene på ulike tidspunkt i forhold til translasjonen kunne vi se hvilken kombinasjon som gir de reneste ansatsene. Vi kunne også ta ut lyd fra simuleringene for å få det bekreftet på denne måten. Resultatet er kanskje litt overraskende: Etter hver luftetur må buen igjen lande på strengen mens hårene fremdeles er på vei i den "gamle" retningen. Derfor skjer bueskiftet ikke i luften (som vist figur 12), men tvert i mot *på* strengen med nesten fullt trykk. Betrakt simuleringen i figur 14 med de innskrevne bemerkningene for å få forklaringen på hva som skjer. Legg merke til likheten mellom figur 11 (målt på fiolinstreng) og simuleringen i figur 14:

**Figur 14:** Ulike faser i et renslig utført spiccato (simulert). Legg merke til at buetrykket nesten er på topp når buen snus (buehastigheten går fra positivt til negativt). Strengens første tilbakeklipp på buehårene (a) skjer omtrent når buetrykket når sitt maksimum. Buens første akselerasjon kan nå skje i overensstemmelse med kravene i figur 7, ettersom buetrykket under de første periodene vil holde seg relativt uforandret. I intervallet (b-c) er det ingen kontakt mellom bue og streng. Ved (c-d) oppnås det gradvis mer kontakt. Under (d-a) slipper ikke buen taket i strengen.



**Figur 15:** Ved å sette et lite merke på buestokken kan man granske koordineringen mellom buens rotasjon og translasjon, og dermed klart se om buen "biter i strengen" eller ikke. (a) vil klart gi de klareste ansatsene, mens (b) vil skape vesentlig mer ansatsstøy.

Hvordan så kan dette hjelpe en som prøver å forbedre sin spiccato-teknikk? Svaret er: Ved å sette et lite merke midt på buestokken vil stokkens bane være fullt synlig under spill. For å oppnå et klarest mulig spiccato skal denne helst likne på (a) i figur 15 (et liggende åttetall). Ser den ut som (b) i samme figur, betyr det vesentlig mer støy i ansatsene. Har man etter å ha øvd på denne måten oppnådd det liggende åttetallet noen ganger, vil man raskt kunne gjenkjenne klangen, hvilket gjør øvingen betydelig lettere.

Våre undersøkelser med mekanisk utført spiccato ga også en del interessante opplysninger: Langs buehårene fra frosch til spiss har en fiolinbue naturlige (rotasjons) ”sprett-resonanser” fra henholdsvis ca 6 til 30 Hz. Om vi f.eks. skal spille raske spiccato sekstendeler i tempo M.M. = 180, trenger vi å drive buen med en ansatsfrekvens på 12 Hz (tolv ansatser i sekundet). Buen utfører dette best om strengen treffer et punkt langs hårene der ”sprett-resonansen” ligger et par Hz høyere (13-14 Hz). Det er nemlig umulig å spille spiccato raskere enn sprettfrekvensen. (Sprettfrekvensen kan du tilnærmet finne ved å slå buen forsiktig mot strengen uten å stryke den i noen retning mens du holder buegrepet er like løst/fast som i spiccato.) Med et spiccato én til to Hz *under* sprettfrekvensen trenger man, på den annen side, ikke å jobbe svært mye. Energien beholdes for en stor del i buestokken. Videre betyr hårenes vinkel en del for sprettfrekvensen: På en fiolin kan man øke denne et par Hz ved å spille med flate buehår, hvilket kan være hensiktsmessig for rask og kraftig spiccato. Vi undersøkte også innvirkningen av buens konkave form på spilleegenskapene. En god spiccato-bue må raskt kunne etablere maksimalt buetrykk når den lander på strengen. Denne prosessen gikk atskillig langsommere etter at vi fikk en buemaker til å rette ut stokken på en av buene våre, og ofte var det umulig å oppnå tilstrekkelig buetrykk uten at stokken slo ned i strengen.

En liten bemerkning: Da vi leverte vår utvalgte bue for utretting hos buemaker Sven-Erik Berg i Stockholm, var han nettopp ferdig med en bue for barokk-tenor. Denne hadde helt rett stokk og var laget i snakewood. Jeg prøvde den med ulike strøkarter, og til min forbauselse var det ikke noe problem å spille et førsteklases spiccato, selv om stokken *ikke* var konkav! Kanskje burde jeg revurdere mitt syn på hvilke strøkarter som var tilgjengelig for musikerne på Bachs tid?

I Ricochet spretter gjerne buen litt høyere enn i spiccato, hvilket senker sprettfrekvensen noe. Her skal froschen gå rett fram i én retning uten å vingle opp og ned, dersom mest mulig rotasjonsenergi skal beholdes i buen slik at mange toner kan spilles på samme strøk. Skal en rekke toner utføres med *lik noteverdi*, må man kontinuerlig kompensere ved å forandre fastheten i grepet og/eller forandre hårvinkelen. Ca 12 centimeter fra hodet på en fiolinbue ligger et punkt som fysikerne kaller ”point of percussion”. Skal en serie ricochet-toner avsluttes med buen liggende på strengen *utenfor dette punktet*, bør froschen presses *ned*. Omvendt bør froschen *løftes* litt om serien skal avsluttes *innenfor* dette punktet. Selve punktet, point of percussion, bør man unngå som landingsmål, ettersom buen er svært vanskelig å dempe på dette stedet. Muligens kan ovenstående være ting å prøve ut for den studenten som ikke fant ut knepet intuitivt... (Flere detaljer om spiccato og ricochet finnes i to artikler som vi publiserte om fysikken bak disse strøkartene<sup>31,32</sup>).

Et forskningsprosjekt som det beskrevet her bygges langsomt opp gjennom å utføre en lang rekke tester av høyst ulike slag. Ofte, som tilfellet var med ricochet/spiccato, kommer det frem langt flere aspekter enn forventet i utgangspunktet.

## 5. Om kommunikasjon mellom akustikere og musikere

Jeg pekte i innledningen på den anstrengte kommunikasjonen som ofte finnes mellom akustikere og musikere. Det kan pekes på mange grunner til at situasjonen er slik den er. I akustikksymposiet som ble holdt i Stockholm i august i år, hadde jeg fått den ære å innlede til, og senere lede, en debatt nettopp om det å undervise musikere i musikkakustikk. I dette avsnittet vil jeg derfor benytte anledningen til å referere noen av de synspunktene jeg gav uttrykk for der, og andre tanker som ble reflektert i debatten. Jeg har i stikkords form valgt å ta utgangspunkt i en rekke potensielle *hindere* som en bør prøve å styre unna dersom kommunikasjonen skal bli fruktbar mellom disse to faggruppene:

### 5.1. Inntrengere

Mange har opplevd akustikere som inntrengere på sine musikalske enemerker. De fleste akustikere som bedriver musikkakustikk er amatørmusikere, og mange av dem har sikkert musikalske ideer de gjerne skulle ha sett realisert. Musikerne på sin side mottar nok av forslag til hvordan å spille – fra dirigenter, kolleger, programkomitéer, lydteknikere, musikkvitere, osv., osv. Et generelt råd til akustikere kunne lyde:

***Ikke fortell en musiker hvordan han/hun skal spille –hva han/hun skal spille  
–eller hvordan han/hun skal øve.***

På den annen side er det svært vanskelig å skrive en artikkel som denne uten å komme med et eneste forslag om nettopp det siste. Dersom musikeren regner med at akustikeren ikke har noe å fare med i en slik sammenheng, er kanskje kommunikasjonen brutt i utgangspunktet: ”*Jeg hører ikke på musikkfaglige uttalelser fra folk som ikke selv kan spille.*” I mitt eget tilfelle (professor i kontrabass ved Norges musikkhøgskole) har jeg jo faktisk i alle fall *kunnet* spille, og håper i denne sammenhengen på en viss lydhørhet nettopp av den grunn. Det finnes faktisk enkelte akustikere som spiller riktig bra, og deres erfaring er at kommunikasjonen med musikere blir vesentlig bedret i de tilfellene der de er i stand til å demonstrere noen av fenomenene de ønsker å beskrive populærvitenskapelig. Det er jo særlig om man skal prøve å introdusere praktisk bruk av forskningsresultatene at problemene oppstår: Da mitt manuskript til kapitlet ”Strings” i boka ”*Science and Psychology of Music Performance*”<sup>33</sup> ble ”reviewet” av en australsk fiolinist, fikk jeg smekk over fingrene fordi jeg hadde skrevet forslag til praktiske løsninger i forbindelse med et strøkproblem. Som strykerlærer gjennom mer enn 35 år har jeg erfart hvordan disse løsningene kan hjelpe utøvere på alle strykeinstrumentene, og aldri mottatt noen kritikk for det. Nå underbygget jeg denne utprøvde teknikken vitenskapelig. I boka fremstår jeg imidlertid ikke som musiker, men som forsker, og dermed var denne reviewerens holdning klar:

***”Stay out of the kitchen!”***

Jeg tror jeg oppfattet poenget, og reformulerte mitt øveforslag slik at musikeren har en overveldende mulighet til å finne løsningen selv.

### 5.2. Terminologi

Utover de vanlig brukte musikkuttrykkene som vi finner på våre noteark, er det forbausende lite felles vokabular vi musikere har når det gjelder musikalske og klangmessige fenomener. Dette gjelder visst likt i alle land. De av oss som liker å skru på knotter (forsterkere, equalizere, MIDIutstyr, etc) har et visst fortrinn når det gjelder sentrale akustiske begrep, men fremdeles innebærer det som regel store problemer når en akustiker skal prøve å forstå hva slags klang en

musiker snakker om. Heller ikke når det gjelder konsertsalsakustikk finnes det blant musikere noen entydig terminologi, selv om mange av oss har hatt konsertsalenes tidligrefleksjoner /etterklang/ekko/flutter/diffusjon innpå oss i en årrekke. ”Varm og kald akustikk” er imidlertid unntak som blir forstått. Det forteller noe om hvor *lang* etterklangstiden er i området under 400-500 Hz, sammenliknet med resten av frekvensområdet (”varm” kan her leses som ”lang”). Andre sentrale begrep som *overtoner* er etter min erfaring ofte dårlig forstått. Dette er i og for seg ikke så merkelig, om man ikke noen gang har fått begrepet lydmessig demonstrert gjennom avspilling av de enkelte deltonene hver for seg. Det viktige begrepet *desibel* (et logaritmisk forholdstall mellom to verdier) gir best mening for dem som har hatt volumknotter med desibelskala på noe av det elektroniske utstyret sitt. Fordelen med desibel er at den stemmer intuitivt ganske bra med hørselsinntrykket av styrkeforandringen, ved at en subjektiv dobling av lydstyrken med god tilnærming kan betegnes med et visst antall desibel. På mange måter er dette en parallell til toneintervall-betegnelsene, der *kvint*, *oktav* og *decim*, korresponderer med *halvannen*, *to* og *to-og-en-halv* ganger frekvensen til det laveste tonen. I de fleste tilfeller har akustikerene sin terminologi nøye definert, mens motparten dessverre ikke er like heldig stillet. Det kan lett føre til frustrasjon hos begge parter.

Matematiske likninger er en type ”terminologi” som gir høyst forskjellige assosiasjoner – ikke minst med bagrunn i hvordan man opplevde matematikkfaget på skolen. Mens en akustiker ser på en likning som den mest konsise og oversiktlige måten å beskrive et fenomen, kan en musiker lett oppfatte et matematisk uttrykk som pedantisk og begrensende – som å ”spille etter stoppeklokke, dirigert av en robot”. Her er det viktig å huske på at likningen vanligvis beskriver en tendens eller utvikling, under den forutsetning at *påvirkninger som ikke er tatt med i likningen ikke finner sted*. I virkeligheten finnes det et utall av påvirkninger som potensielt kan forandre resultatet noe, og dette vet akustikeren godt. Likningene gir likevel, for dem som er i stand til å lese dem, den beste oversikten. Faren er at folk som ikke har erfaring med å lese fysiske formler lett sammenblander og sammenlikner likningens fokuserte forenkling med ønsket om størst mulig frihet i en kompleks virkelighet.

### 5.3. Fragmentering

I alle vitenskaper søker man å isolere de fenomenene man ønsker å betrakte, slik at effekten av omgivelsenes mange påvirkninger blir minst mulig. Pianoets ansats har vært gjenstand for slik separering. Den rådende forestillingen hos akustikere er at klangen i et anslag (på én enkelt tone) ikke kan forandres uavhengig av ansatsstyrken, med mindre man benytter pedaler eller trykker ned andre tangenter. Motforestillingene er mange både hos musikere og pianofabrikanter. Enkelte pianofabrikanter stemmer hammerskaftene slik at de kan vibrere med hensiktsmessige frekvenser, *mer* når anslaget er hardt, og *mindre* når anslaget er av legato-typen. Teoretisk skal dette kunne få klangmessige konsekvenser ettersom hammerhodet ligger an mot strengen et stykke tid. Før hammerfilten treffer strengen har musikeren gitt hammeren viss hastighet som bestemmer lydstyrken, og som ikke kan påvirkes i den siste fasen mens det ikke finnes kontakt mellom hammer og tangent. Noen spektral effekt av hammerskafts-vibrasjonene er aldri påvist vitenskapelig, men kan heller ikke utelukkes. Imidlertid vil en relativt stor del av klangen i et piano ikke dannes i strengen, men i bunnen under tangentene når tangenten brått stoppes der. Her virker pianoet til dels som et perkusivt instrument uten strenger. Hører man på strengesignalet alene, kan det ofte virke ganske sterilt og glatt, men sammen skaper disse ”to instrumentene” den fyldige pianoklangen vi kjenner. Og lydstyrken til disse ”to” kan til en viss grad reguleres hver for seg. Er dette nyttig informasjon for pianisten? Vil spillet bli bedre? Jeg har vanskelig for å tro det. I de fleste tilfeller vil slik informasjon være med på å forvrengte det bildet musikeren har av tonene som dannes, splitte dem opp i stedet for å la dem fremstå som enheter eller gjenstander det kan ”lekes” og ”sjongleres” med. Nytte vil det vel først og fremst kunne gi til den pianisten

som er ute etter nye klanguttrykk, der de ”to instrumentene” har mulighet til å operere hver for seg, kanskje understreket ved hjelp av moderat elektronikk.

Oppsplitting av toner i ansats- og avslutningsforløp, deterministiske og stokastiske fenomener, etc. kan etter min mening kun være nyttige for musikeren under øving, og da under forutsetning at de er mentalt mulige å kombinere igjen i god tid før podiet skal inntas – *eller* om musikeren ønsker å bruke splittingen direkte i et utradisjonelt musikalsk uttrykk. En akustiker burde ikke bli svært overrasket om en musiker som holder seg innen for de tradisjonelle spillestilene virker uinteressert i alle de små klanglige detaljene som kan ramses opp for ham.

#### **5.4. Tradisjon**

Den vanligste måten å lære å spille et instrument har til alle tider vært imitasjon av ”den som kan” etter Mester/lærlingprinsippet. Det er hørselsinntrykk av gode forbilder som, i alle fall i første omgang, skaper idealene man jobber mot, og det er øret som avgjør hvor langt man har nådd. Her må akustikerens viktigste oppgave være å bidra med informasjon som kan hjelpe instrumentalisten i forhold til akustiske og tekniske omgivelser (f.eks. podieplassering, lydopptak, hørselsskader<sup>34</sup> og -psykologi<sup>35</sup>). Og i forhold til mer eller mindre ukjente egenskaper ved instrumentet, som kan ha spilleteknisk betydning (f.eks. at når en oboist/fagottist holder luft lenge i lungene byttes surstoffet gradvis ut med den tyngre gassen kulldioksyd, noe som kan føre til 10-15 cents senkning av tonehøyden om dette ikke motvirkes av embouchuren<sup>36</sup>). Selv opplevde jeg i 1968, i mitt første møte med en akustiker, å få svar på hva som måtte gjøres med instrumentets stol for å få litt mer briljans (beskrevet i avsnitt 3.3.4.). Rådet han ga virket fortreffelig, og instrumentet ble atskillig lettere å spille på. Den påfølgende høsten skar vi i nesten alle kontrabasstolene i Filharmonien – med godt resultat. *Vi* hadde gjort et musikalsk valg, og fått kyndig hjelp.

Så lenge musikkutøvelsen og opplæringen foregår innenfor etablerte musikalske idealer og tradisjoner, bør vel en akustiker være tilbakeholden med å gå nærmere inn på fenomener som angår tolkning og klang. Ønsker man, som unntak fra denne regelen, å korrigere feilaktige forestillinger om hvordan ting ”virker”, bør man egentlig ikke regne med at musikeren får noen umiddelbar gevinst av dette, annet enn eventuelt gjennom sin undervisning.

#### **...versus innovasjon**

Forholdet stiller seg annerledes om musikeren befatter seg med samtidsmusikk, eller annen type musikk der det ikke i samme grad finnes etablerte rammer for tolkning og undervisning. Hva ville f.eks. elektronisk musikk, eller elektronisk forsterkede instrumenter vært uten akustikere? Her er det nettopp øret for detaljer, kjente og ukjente klangfenomener og teksturer, som behersker podiet. Jobber man med denne type musikk, vil f.eks. kjennskap til signalanalyse være et stort fortrinn selv om man ikke forstår særlig mye av matematikken digitalteknikken bygger på. Denne type studenter vil i større grad søke informasjonen der den finnes. Det er vel dessverre ofte slik at når ens ”gamle musikk lærer” ikke lenger rår grunnen alene, så åpner mulighetene seg forbausende raskt, selv om det kanskje ikke blir så mye penger i kassa av det...

For dem som frykter at syntetisk elektrisk musikk skal overta fullstendig, kan det muligens være en trøst å høre at tiden er over der publikum satt og glodde på to eller flere høyttalere. Musikeren, kommuniserende med sitt publikum, er tilbake på podiet. Forskningen og utviklingen rundt samtidsinstrumenter er i dag i stor grad preget av et komplett scenebilde med utøveren i sentrum. Men den tiden er muligens forbi, da det var tilstrekkelig å komme inn på scenen med et konsentrert uttrykk i ansiktet.



## 5.5. Motivasjon

Det forbauser meg at så mange av våre studenter tror svarene på nesten alle musikalske spørsmål finnes på øverommene. Ikke slik å forstå at jeg mener det er galt å øve! Men, jeg synes det er frustrerende når studentene i store grupper flykter inn i øverommene fra forelesninger med emner som griper rett inn i sentrale musikalske spørsmål de burde være opptatt av. Kanskje har de kjøpt ”løsningen” på CD? Her synes det også være en markert forskjell mellom dem som arbeider innen en tradisjon, og dem som går nye veier. Jeg har lyst til å sitere Xavier Serra<sup>37</sup>, en foregangsmann innen computerassistert musikk:

”Most of the old European institutions in music education were established following the central European tradition of music conservatories and have not been able to adapt to the cultural and social changes that have taken place during this [the 20th] century. These conservatories were designed with the fundamental goal of training instrumentalist and based on the romantic view of the virtuoso performer as the ideal musician. But the musical needs of our society have been changing fast in the last few decades and the music profession is going through drastic transformations.”

Videre omtaler Serra forholdet mellom universitetene og musikkutdanningen, og peker på at der musikkutdanningen er forbundet med universitetene, eller samarbeider med andre typer forskningsinstitusjoner, blomstrer nye kunst- og musikkformer opp, og studentene der benytter seg av den greie tilgangen til relevant informasjon som finnes i miljøet. Innen våre egne institusjoner er det ikke engang vanlig at studentene tar kontakt med lokal ekspertise uten at de har fått beskjed om gjøre dette av læreren sin.

## 5.6. Fornærmelser

Å fortelle eieren av en 800 000 kroners platinafløyte at han like gjerne kunne kjøpt en forsølvet av samme merke, krever atskillig omtanke og taktfullhet, dersom det da er sant! (Se avsnitt 3.3.3.) Å antyde at alle aktuelle legeringer klinger likt er nesten jevngodt med å antyde at fløytisten er dum eller letturt. I begge tilfeller blir videre kommunikasjon vanskelig. Faktum er, imidlertid, at til dags dato har akustikerne ikke funnet noen forklaring på hvordan slike klangforskjeller skulle kunne oppstå, i og med at instrumentet selv vibrerer såpass lite at det ikke gir målbar innvirkning på den vibrerende luften på innsiden som danner tonen. Vibrasjoner i fløytekroppen virker dessuten dempende i den grad de i det hele tatt ”virker”. En teori bygger på at kanten av embouchure- og fingerhullene kan formes noe lettere med enkelte legeringer enn andre, men her er faktisk gull det beste metallet, ikke platina, som er dyrest.

I det vitenskapelige miljøet bygges det opp en felles forståelse av fenomener over tid. I forkant av denne fellesforståelsen vil det, og må det, alltid finnes forskere som med stor iherdighet forfekter nye teorier. Det er særlig i denne fasen at fornærmelser kan skje, og ikke minst om nyheten er av det sensasjonelle slaget. Det man som forsker bør være særdeles varsom med er å uttale seg skråsikkert om fenomener som ”ikke finnes”. Kanskje har man ennå ikke funnet en adekvat målemetode? Dersom musikeren skal ha noen grunn til å stole på forskeren (”...som ikke kan spille”), må det bygges opp en tillit basert på erfaring med at den informasjonen forskeren har å tilby vil være relevant og betydningsfull i sammenhengen.

## 5.7. Patronisering

Jeg har selv, som musiker, fått føle nedlatenhet fra akustikere ved et par anledninger. Dette var særlig irriterende ettersom det dreide seg om musikalske spørsmål, der musikeren burde være spesialisten. Den første dreide seg om akustikken i Oslo Konserthus mens dette var på planleggingsstadiet. Som medlem av byggekomiteen var jeg, sammen med en gruppe kolleger fra Filharmonien, på befarings i Roskilde der modellen av Oslo Konserthus sto oppført i skala 1:10 – og i Tivolis konsertsal i København, som var designet av samme akustiker. Akustikeren

hadde simulert klangen i Oslos nye konserthus ved å spille av et bånd fra scenen i modellen med ti ganger hastigheten (sang med orkester) mens han med samme båndhastighet gjorde opptak med mikrofon bak i modellens sal. Nå ønsket han å høre hva vi foretrakk av to forskjellige takbjelkekonstruksjoner som hadde innvirkning på etterklangen. Etter å ha hørt på de to opptakene avspilt med normal hastighet var musikergruppen internt ganske enige om at den ene klang vesentlig bedre enn den andre. Akustikeren på sin side var *fullstendig uenig* i vår vurdering, og det var det siste vi hørte om den saken... Ingen begrunnelse, ingen diskusjon! Videre ble vi bedt om å vurdere klangen i Tivolis konsertsal under en orkesterkonsert med ulike besetninger. Når orkestret satt inne på selve scenen syntes vi det var ”for lite bass”, noe som imidlertid bedret seg noe da bassgruppen senere flyttet ut på et sceneutbygg i løst treverk. I begge plasseringer låt fiolinene fjernt med mindre man plasserte seg slik i salen at man hørte fiolingruppen reflektert av reflektoren som hang ut over sceneåpningen. Da vi konfronterte akustikeren med dette, var svaret: ”*Det finnes ingen klanglig ubalanse i denne sal!*”

Takk for det! Og det samme gjelder vel formodentlig Oslo Konserthus?

Det andre tilfellet var da NRK skulle starte opp med prøvesendinger i stereo. Som representanter for Filharmonien møtte vi opp i kringkastingshuset for å høre på noen prøveopptak de hadde gjort. Jeg hadde på den tiden sammen med venner i flere år eid et selvbygget lydstudio. Vi hadde gjort stereoopptak i enda flere år, og noen av disse opptakene var solgt til NRK og blitt rost for sin kvalitet. En viss erfaring hadde jeg altså med stereofoni. Da jeg under møtet forsiktig ymtet frempå med at jeg syntes orkesteropptaket var litt udefinert – man kunne ikke høre hvor instrumentene befant seg, det hele ”fløt litt” – fikk jeg til svar: ”Jaså, du vil ha ping-pong-stereo du?” Da var mesteparten av diskusjonen over for mitt vedkommende.

## 6. Noen ettertanker

Forholdet mellom musikere og akustikere har forbedret seg sterkt i løpet av de siste tretti årene. Det kan pekes på en rekke forhold som har bidratt til denne utviklingen, blant annet:

- Musikere har generelt blitt mer ”teknisk innstilt”, bl.a. gjennom å behandle opptaks- og avspillingsutstyr.
- En rekke nye elektroniske instrumenter har sett dagens lys, instrumenter som er skapt i tett samarbeid mellom musikere og akustikere.
- Mange nye musikkformer har oppstått, og barrierene mellom musikere som praktiserer gamle og nyere stilarter er blitt vesentlig mindre.
- Fonogrammer har for en stor del tatt over som norm og ideal etter konsertsalens litt mer distanserte lydbilde<sup>38</sup>.
- Den akustiske forskningen har kommet lenger, og er blitt vesentlig mer nyansert og detaljert.

Selv om instrumentakustikk-forskning har pågått i århundrer, er det først etter datamaskinens inntreden at detaljert forskning har vært mulig. (Tidligere tiders forskere var for en stor del tvunget til å overforenkle problemene, ettersom de vanligvis skulle gjøres til gjenstand for oversiktlige matematiske analyser.) Som et eksempel på denne utviklingen kan nevnes NTH-professor Asbjørn Krokstad sitt program for ”strålegangsanalyse”, utviklet på slutten av 60-tallet. Med denne analysen (som er standardprosedyre i dag) kan man holde regning med hvor lyden blir av etter tusenvis av refleksjoner på vegger, tak, gulv, og ikke minst på publikum, og på denne måten bl.a. forebygge at det oppstår ”umulige” lytteplasser i salen. Alternativet til dette er

å bygge store modeller, men da får man ikke like enkelt vite *hvordan* eventuelle feil oppstår. Slike programmer har også tillatt mye større nærgåenhet og detaljeringsgrad i forhold til mekanismer som er ulineære og til dels kaotiske, som f.eks. luftvirlvne i et fløytemunnstykke. Utviklingen, som parallelt har funnet sted innen numeriske analysemetoder, har gitt akustikerne et mye tryggere grunnlag å uttale seg på enn tidligere.

Jeg nevnte i innledningen *kvalitetssikring* som stikkord i forbindelse med de mange mytene om strykeinstrumenter som holdes godt i live ved konservatorier og høyskoler verden over fordi Mester/lærlingprinsippet følges blindt. Det er min egen erfaring at svært få kolleger blant strykerlærerne viser interesse for få presentert forskningsresultater eller eventuelle korrektiver til sin egen undervisning. Det finnes imidlertid en relativ enkel måte å sikre at mest mulig korrekt informasjon når ut, i alle fall til en del studenter:

### ***Legg ut informasjonen lett tilgjengelig på nett!***

Forhåpentligvis vil en slik undervisningspolitikk på sikt føre til at uholdbare påstander blir vesentlig vanskeligere å forsvare! Som et par eksempler på god informasjon vil jeg avslutningsvis nevne to bøker, tilgjengeliggjort på nett av KTH i Stockholm: "*Acoustics for violin and guitar makers*" (Jansson<sup>39</sup>), og "*Five lectures on the acoustics of the piano*" (Askenfelt, red.<sup>40</sup>). Den siste med mange glitrende lydeksempler.

I 1989 deltok jeg som musiker med interesse for strykeinstrumentenes akustikk på mitt første akustikksymposium. Her opplevde jeg en verden som var langt mer åpen for innspill fra sidelinjen enn mitt eget musikermiljø noen gang har vært i forhold til akustikere – eller andre som "forsøker å blande seg inn i koret". (Var det noen som nevnte *patronisering*?) Forskerne jeg har møtt virker i miljøer der faglige ideer stort sett blir utvekslet raskt og fryktløst. Som musiker i dette miljøet har jeg følt at mine meninger og erfaringer blitt lyttet til med interesse fordi de fleste akustikere er klar over at musikeren besitter ekspertise som – om den kan formuleres begripelig – vil hjelpe dem til å sette fokus på viktige problemer i deres kontinuerlige arbeide med å forstå og (videre-) utvikle gode instrumenter. Min egen tilnærming til akustikk har først og fremst vært basert på å prøve å analysere hvilke muligheter musikeren har til å påvirke klangen i strykeinstrumentet. Avsnitt 4 i denne artikkelen viser kanskje at svarene er atskillig mer komplekse enn man (også strykere) i utgangspunktet skulle tro. Videre har jeg jobbet med analyser av fenomener mer av interesse for samtidsmusikk, som f.eks. å spille toner under strykeinstrumentenes normale register, osv. Innen det akustiske miljøet har denne tilnærmingen i stor grad vært noe nytt – i alle fall når det gjelder strykeinstrumenter – hvilket har ført til betydelig interesse blant akustikere verden over.

Det sier seg selv at forskning av den typen jeg har bedrevet krever medvirkning av en person med atskillig erfaring som utøver/pedagog dersom resultatet skal bli godt og fokus riktig plassert. Det var derfor svært gledelig under årets symposium i Stockholm å oppleve flere forskningsrapporter som på en adekvat måte tok tak i *ren utøverproblematikk*. For eksempel, en sammenlikning av press på munnstykket hos profesjonelle trompetere og studenter på forskjellige nivåer<sup>41</sup>. Norges musikkhøgskole har ikke noe akustikklaboratorium. Personlig har jeg vært heldig og fått tilgang til et av de mest kvalifiserte miljøene når det gjelder forskning på strykeinstrumenter, der jeg så langt har fått benytte de ansattes ekspertise og laboratorium uten vederlag. Tilsvarende gjelder for noen av mine kolleger innen vokalfaget. (Inst. för Tal, Musik och Hörsel ved KTH – Stor takk til det høyt kvalifiserte personalet der!) Om NMH skal kunne utvikle et eget forskningsmiljø innen instrumental- eller vokalakustikk avhenger dette i høy grad av hva fremtidens studenter vil finne relevant i forhold til sin opplæring og sin musikk. Det vil si

– hvor godt vi som *akustikere* og *musikere* klarer å formidle relevant kunnskap på en hensiktsmessig måte – begge veier – mellom forskning og utøving.

*Akustikk er ikke, som mange later til å tro, synonymt med konsertsals- eller romakustikk. Akustikk omfatter alt fra og med lyden blir skapt – til og med øret og hjernen har oppfattet den. Her finnes det en et vidt spektrum av emner som burde interessere de musikerne som ser musikk i et videre perspektiv enn som ren, personlig instrumental utfoldelse.*

---

## Referanser

- <sup>1</sup> En del av stoffet i dette avsnittet er hentet fra: Hutchins, C. M., (1983) A history of violin research. *Journal of the Acoustical Society of America*, 73(5), 1421-1440.
- <sup>2</sup> Raman, C. V., (1918). On the mechanical theory of the vibrations of bowed strings and of musical instruments of the violin family, with experimental verification of the results. Part 1. *Indian Assoc. Cultiv. Sci. Bull.* 15, 1-158.
- <sup>3</sup> Duhamel, J.M.C., (1841) Mémoire sur l'action de l'archet sur les cordes. *Extr. Mém. Acad. Sci. Savants Étrangers* 8, Imprimerie Royale, Paris, 6-36.
- <sup>4</sup> Menzel, R. E., and Marcus, R., (1979). The microstructure of horse hair. *Catgut Acoustical Society Newsletter*, No. 32, 14-20.
- <sup>5</sup> Rocaboy, F. (1990). The structure of bow-hair fibres. *Catgut Acoustical Society Journal*, 2d, 1(6), 34-36.
- <sup>6</sup> Helmholtz, H. F. (1862). *Lehre von den Tonempfindungen [On the sensations of tone]*. Braunschweig: Vieweg. [New York 1954: Dover.]
- <sup>7</sup> Raman, C. V. (1920). Experiments with mechanically played violins, Vol. 6, parts I & II. *Proceedings of Indian Association of Cultivation of Science*, 19-36.
- <sup>8</sup> Nettadresse: <http://www.catgutacoustical.org/>.
- <sup>9</sup> Innspillingene kan bestilles via <http://www.newviolinfamily.org/cd.html>.
- <sup>10</sup> Yo-Yo Ma: The New York Album. Baltimore Symph. Orch., Cond.: David Zinman. Sony (1993).
- <sup>11</sup> Verillio, R., (1992) Vibration sensation in humans. *Music Perception* Vol. 9, No 3, 281-302.
- <sup>12</sup> Knott, G. A., (1987) *A modal analysis of the violin using MSC/NASTRAN and PATRAN*. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, U.S.A.
- <sup>13</sup> Weinreich, G. (1997). Directional tone color. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(4), 2338-2346.
- <sup>14</sup> McIntyre, M. E. et al. (1979) On the fundamentals of bowed-string dynamics, *Acustica* Vol. 43, 93-108.
- <sup>15</sup> Schumacher, R. T. (1979) Self-sustained oscillations of the bowed string, *Acustica* Vol. 43, 109-120.
- <sup>16</sup> Askenfelt, A., og Guettler, K. (2001) Bows and timbre—myth or reality? Proceedings of International Symposium of Music Acoustics, Perugia, Italia 2001.
- <sup>17</sup> Rodgers, O. E., and Masino, T. R., (1990) The effect of wood removal on bridge frequencies. *Catgut Acoustical Society Journal* Vol. 1., No 6 (Series II) November, 6–10.
- <sup>18</sup> Les omtale av prosjektet "Numerical optimization of violins and bows" i *Catgut Acoustical Society Journal* (2003) Vol. 4, No 7 (Series II), 68-69.
- <sup>19</sup> Guettler, K., & Askenfelt, A. (1997). Acceptance limits for the duration of pre-Helmholtz transients in bowed string attacks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(5) Pt 1, 2903-2913.
- <sup>20</sup> Guettler, K., (2002) *The bowed string—on the creation of the Helmholtz motion, and on the development of anomalous low frequencies*. Doktoravhandling, Kungl. Tekniska Högskolan, ISBN 91-7283-279-7.
- <sup>21</sup> Galluzzo, P. M., and Woodhouse, J., (2003) Experiments with an automatic bowing machine. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC'03)* Vol I, 55-58.
- <sup>22</sup> Guettler, K. (2002) On the creation of the Helmholtz motion in bowed strings. *Acta Acustica/Acustica* Vol. 88, 970-985.
- <sup>23</sup> Schelleng, J. C. (1973) The bowed string and the player. *Journal of Acoustical Society of America* Vol. 53(1), 26-41.

- 
- <sup>24</sup> Pickering, N., (1990) String tone quality related to core material. *Catgut Acoustical Society Journal* Vol. 1, No 5 (Series II), 23-28.
- <sup>25</sup> Guettler, K., Schoonderwaldt, E. and Askenfelt, A., (2003) Bow speed or bowing position—which one influences the spectrum the most? *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC'03)* Vol I, 67-70.
- <sup>26</sup> Askenfelt, A., (1989) Measurement of the bowing parameters in violin playing. II: Bow-bridge distance, dynamic range, and limits of bow force. *Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 83, 2, 503-516.
- <sup>27</sup> Schoonderwaldt, E., Guettler, K., and Askenfelt, A., (2003) Effect of the bow hair width on the violin spectrum. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC'03)* Vol. I, 91-94.
- <sup>28</sup> Pitteroff, R., (1995). *Contact mechanics of the bowed string*. Doktoravhandling, University of Cambridge, U.K.
- <sup>29</sup> Williams, C. E. (1985). “*Violin bowing skill analysis: The mechanics and acoustics of the change in direction*”. Doktoravhandling, University of Melbourne, Australia
- <sup>30</sup> Simuleringsprogrammet FIDDLE er utviklet av K. Guettler og beskrevet i ref. 20.
- <sup>31</sup> Guettler, K., and Askenfelt, A., (1998) On the kinematics of spiccato and ricochet bowing. *Catgut Acoustical Society Journal* Vol. 3, No 6 (Series II), 9-15.
- <sup>32</sup> Askenfelt, A. and Guettler, K., (1998) The bouncing bow – An experimental study. *Catgut Acoustical Society Journal* Vol. 3, No 6 (Series II), 3-8.
- <sup>33</sup> Parncutt, R. E., and McPherson, G., Eds. (2002) “*The Science and Psychology of Music Performance*”, Oxford University press, New York. ISBN 0-19-513810-4.
- <sup>34</sup> Chasin, M., (1996) “*Musicians and the prevention of hearing loss*”. Singular Publishing Group Inc. ISBN 1-56593-626-4.
- <sup>35</sup> Moore, B. C. J., (1997) “*An introduction to the psychology of hearing*”. Academic Press, ISBN 0-12505627-3.
- <sup>36</sup> Fuks, L., (1999) “*From air to music—acoustical, physiological and perceptual aspects of reed wind instruments playing and vocal-ventricular fold phonation*” Doktoravhandling, Kungl. Tekniska Högskolan, ISSN 1104-5787.
- <sup>37</sup> Serra, X., fra sitt nettsted I 2001.
- <sup>38</sup> Lesere interessert i denne problematikken bør lese Glenn Gould: The prospect of recording, fra boka Tim Page, “*The Glenn Gould reader*”, Alfred A. Knopf (1984), senere: Vintage Books (1990), ISBN0-679-73135-0.
- <sup>39</sup> Jansson, E., “*Acoustics for violin and guitar makers*” <http://www.speech.kth.se/music/acviguit4/index.html>.
- <sup>40</sup> Askenfelt, A., “*Five lectures on the acoustics of the piano*” [http://www.speech.kth.se/music/5\\_lectures/](http://www.speech.kth.se/music/5_lectures/).
- <sup>41</sup> Petiot, J.-F., (2003) Measurement of the force applied to the mouthpiece during brass instrument playing. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC'03)* Vol I, 225-228.