

Flagermusens biosonar

AF BERTEL MØHL

Sonar er et af de utallige kunstord, som samfundets teknologisering har velsignet vort sprog med. Det er dannet ved en sammentrækning af SOund Navigation And Ranging, og det bruges om systemer, der aktivt »belyser« omgivelserne med lyd og orienterer sig ved »genskæret«, dvs. ekkoerne. Ekko-lod, fiskelup og visse tyverialarmer, grej til ubåds-sporing og seismik er eksempler på sonarer. Alle disse ting er udviklet i de sidste fyrrer år efter anden verdenskrig, de tilhører samme aldersgruppe som fjernsynet, rock-musikken og opvaskemaskinen.

Men sonar princippet har været i brug meget længere hos to specialiserede pattedyrgrupper, nemlig flagermusene og tandhvalerne, der begge kan føres mere end 30 millioner år tilbage. De to grupper er ellers så forskellige som de nødvendigvis må være, når de skal være tilpasset livet i henholdsvis lufthavet og verdenshavet, men de har eet vigtigt problem til fælles: De har ikke megen gavn af synet. Hvalerne fordi sigtbarheden i havet, målt i kropslængder, er meget ringe; desuden er der på dybt vand meget lidt lys. Og flagermusene, fordi de af deres konkurrenter, fuglene, bogstaveligt talt er sendt ud i mørket. De to grupper er altså at betragte som synshandicappede, og må på samme måde som blinde bruge det, der undertiden kaldes den 6'te sans, et lidt upræcist udtryk til at betegne evnen til at orientere sig på måder, der ikke umiddelbart falder ind under »de fulde fem«: syn, hørelse, lugte-, smags- og følesans. Biosonarforskningen har bidraget til forståelsen af den 6'te sans' natur.

Spallanzani

Een af de allerførste og mest betydende eksperimentelle biologer var Lazzaro Spallanzani (1729-

1799). Han var en naturhistorisk polyhistor med særlig interesse for respiration og fordøjelse, vulkanologi og meteorologi. Han virkede som abbed, professor og museumsmand ved universiteterne i Reggio, Modena og Pavia i Norditalien. Hans måde at tænke og arbejde på er et stadigt gyldigt skoleeksempel for eksperimentel biologi. Mest kendt er han for den eksperimentelle afvisning af ideen om spontan generation, dvs. forestillingen om at livet til stadighed opstår af dødt materiale, f.eks fluer af råddent kød, og mus fra pulterkammer-rod. Spallanzani lavede en næringsrig suppe, som han steriliserede ved kogning i en speciel glas-kolbe med en lang, snæver, nedadbøjet tud, der forhindrede indtrængning af dyr og kim, og som han havde stående i månedsvis, uden at der dannedes de »animalcules«, man ellers ville have set udvikle sig i sådan en suppe. Dette simple forsøg var den væsentligste årsag til, at man begyndte at spekulere over, hvordan arterne så var opstået, hvilket som bekendt førte til den centrale, biologiske teori, evolutionstesen.

Spallanzani interesserede sig også for sanserne. I 1793 arbejdede han i en sen nattetime ved stearinlys i et værelse, hvor han havde en slørugle flyvende omkring. Da han slukkede lyset, fløj uglen sanseløst ind i møbler og vægge, hvad han åbenbart har undret sig lidt over, for uglerne er netop een af de meget få fuglegrupper, der er aktive om natten. Tilfældigvis havde han også nogle flagermus i værelset og for at sammenligne, slap han nu også disse løs og slukkede igen lyset. Resultatet var helt anderledes: Flagermusene fløj elegant og sikkert uden om alle forhindringer, uanset om der var lys eller ej.

Spallanzani's første hypotese var meget enkel: flagermusene kan se ved meget lavere lysintensitet end hvad uglen og han selv kunne, og han lavede straks et lille forsøg til at prøve denne hypotese. Han syede en lille hætte af noget let, uigennemsigtigt stof, som han trak over hovedet på flagermusene. Nu fløj de lige så ubehændigt som før uglen i mørke.

I de næste par dage var han ganske godt tilfreds med sin hypotese om flagermusenes overlegne nattesyn. Men så fik han sine tvivl. Måske havde han gjort andet og mere med sine hætter end blot at blokere synet. Han lavede så nogle nye hætter, men denne gang gennemsigtige, – og fik det samme resultat! Han indså umiddelbart betydningen af denne iagttagelse, for Spallanzani havde en klar forståelse for det videnskabsteoretiske princip, der først i vort århundrede er blevet kendt som falsifikationsprincippet. Det siger, at man almindeligvis ikke kan bevise en korrekt hypoteses gyldighed, men kun kan afsløre falske hypoteser. Forsøgsresultatet med de uigennemsigtige hætter var ikke i strid med hypotesen om flagermusenes overlegne nattesyn, men forsøget med de klare hætter var, – og det er det, der tæller.

Flagermusenes 6'te sans

Fra da af og til sin død 6 år senere arbejdede Spallanzani energisk med flagermuseproblemet. Han førte en udstrakt korrespondance om det med sine lærde kolleger, og een af disse, prof. Jurine i Geneve, kom ret hurtigt til den konklusion, at en uhindret hørelse var en nødvendig betingelse for flagermusenes 6'te sans. Spallanzani udtænkte og gennemførte nogle elegante forsøg, der overbeviste ham om, at det virkelig forholdt sig sådan: han smedede nogle ganske små blik-rør, som han kittede fast i øregangene på en flagermus. Det generede ikke flagermusens orienteringsevne mærkbart. Derefter proppede han rørene til med voks, og fik præcis den samme reaktion som i forsøgene med hætterne: flagermusen tumlede hjælpeløst rundt. Da han derefter fjernede vokspropperne, fløj flagermusen igen fint.

I mange af sine øvrige forsøg med flagermus brugte Spallanzani den teknik at blinde dyrene. For os, hvor synssansen er dominerende, forekommer dette umiddelbart barbarisk, men hans

resultater viste, at det ikke i væsentlig grad ændrede flagermusenes adfærd: de fløj effektivt, kunne finde tilbage til det kirketårn, hvor han havde fanget dem, og fange insekter så godt, som før indgrebet. Altsammen observationer, der styrkede hans interesse for den 6'te sans.

Trods sine mange virkelig kritiske observationer nåede Spallanzani ikke til en egentlig forståelse af mekanismen bag den 6'te sans. Fra hans sidste leveår findes et brev, hvori han opsummerer situationen således:

»Flagermusens øren tjener mere effektivt end øjnene til at opfatte afstande, for et blindt dyr flyver ind i forhindringer, når dets øren er tilstoppede. Prof. Jurine's forsøg, som er bekræftet af de mange og varierede forsøg, jeg selv har gjort, viser hinsides al tvivl ørernes afgørende betydning for blinde flagermus' flyvning. Kan det derfor siges, at deres øren snarere end deres øjne tjener til at lede deres flugt? Jeg kan kun sige, at døve flagermus flyver miserabelt i såvel lys som mørke, og at blinde flagermus flyver uden om forhindringer i såvel lys som mørke.«

Men hvad det var, flagermusene kunne høre, kunne han ikke begribe. På det tidspunkt vidste man ikke, at lyd er en bølgebevægelse af trykændringer. Det eneste instrument man dengang havde til lydregistrering, var det menneskelige øre, og det er kun følsomt i et begrænset bølgeområde. Antallet af lydbølger, der passerer forbi et punkt, f.eks. et øre i eet sekund angiver bølgerens frekvens eller hyppighed, om man vil. Frekvensen angives i Hertz. Jo højere frekvens, jo flere bølger, og jo kortere afstand – bølgelængde – imellem dem. Lydhastigheden, er proportionalitetsfaktor mellem bølgelængde og frekvens. Ved menneskets øvre høregrænse, der »ved dekret« er sat ved 20 000 Hz, er bølgelængden små 2 cm. Efter en ren antropocentrisk definition kalder man lyd med energi på frekvenser over 20 000 Hz for ultralyd, selv om det hverken har fysisk eller biologisk mening. De fleste andre pattedyr, heriblandt flagermus og hvaler kan høre fra 1 til 3 oktaver i ultralydsområdet. (Se box).

For at noget – det være sig et flyvende insekt, en gren, eller en mur – skal kunne reflektere lyd, dvs. danne et ekko, skal dette noget være stort, målt i bølgelængder. Kun i kraft af, at flagermusene bruger bølgelængder, der er få millimeter store, kan de jage flyvende insekter så små som bananfluer (her skal man huske at medregne de udsprede vinger i størrelsesberegningen). Uden instrumenter og uden det nødvendige, teoretiske apparat havde Spallanzani – trods sit ubestridelige eksperimentelle og analytiske talent – ikke forudsætningerne for at komme forståelsen af den 6'te sans' virkemåde nærmere. Først i dette århundrede var begge disse forudsætninger tilstede. Sonarprincippet som forklaring på det klassiske problem var nærliggende, og ideen opstod da også uafhængigt og i forskellige varianter flere steder. Men først den amerikanske zoolog Griffin's direkte påvisning i 1938 af at flagermusene udsendte en strøm af kraftige ultralydspulser, og hans efterfølgende forsøg, der i mangt og meget var en gentagelse af Spallanzanis forsøg, blot med den vigtige tilføjelse af en ultralyds-detektor, skabte den endelige klarhed.

Flagermusenes sonarskrig

En vigtig nøgle til forståelsen af, hvordan disse dyr kan flyve lige så elegant i buldermørke som en svale i fuldt dagslys, flyve helt tæt på vegetationen, og forfølge insekter så små som bananfluer eller så hurtige som spindere, er ultralydsskrigenes egenskaber. Det har vist sig, at de fleste arter har deres eget, karakteristiske skrig, der ganske godt afspejler artens flyve- og fangststrategi, – niche, om man vil. Man kan derfor ikke sige ret meget generelt om disse skrig. De ca. ti arter, der findes i Danmark, tilhører dog alle barnæsernes (vespertilionidernes) storfamilie. Deres skrig er meget korte, omkring 1/1000 sec (1 msec), men i denne korte tid når de at lave en perfekt glissade, der spænder over ca. 1 oktav. Dette kaldes frekvensmodulerede skrig, og de flagermus, der benytter denne type skrig, kaldes FM-flagermus. Sydflagermusen skriger fra 50 til 25 kHz, Dværgflagermusen fra 110 til 55 kHz. Og det er langt fra dolce. Der er målt lydtryk på 110 til 120 dB SPL (box) 10 cm foran disse kræ, der vejer henholdsvis 15 og 5 gr. Disse lydtryk er fuldt så kraftige

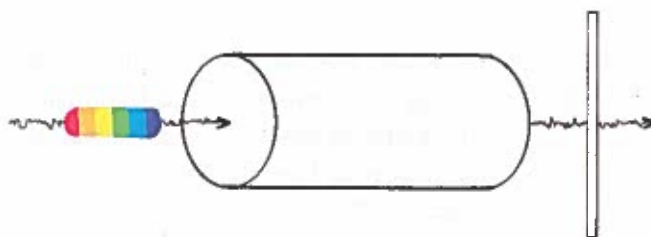


Fig. 1. Pulskompression. Optisk analogi.

som de, en professionel sergent på 85 kg kan præstere. Det er iøvrigt noget nær det maximale lydtryk, der kan transmitteres i luft uden kraftigt tab, dvs. varmedannelse.

Betydningen af disse meget kraftige lyde er umiddelbart forståelig, når man tænker på biosonar som en akustisk pendant til manden, der orienterer sig med en stavlygte: jo mere lys, jo længere kan han se og jo flere detaljer kan han skelne. Men jo lettere kan han også selv ses, jvf. den klassiske tyveknægts blændede lygte. Og det er der adskillige af de natflyvende insekter, der har opdaget.

Insekternes forsvar

Man må forestille sig udviklingen efter følgende drejebog: I meget gamle dage, dvs. fra kul- til slutningen af kridttiden, var livet for insekterne

BOX

Hertz: Svingninger per sekund, fork. Hz. 1 kHz: 1000 Hz.

Menneskets øvre høregrense: 20 kHz.

Ultralyd: Lyd med frekvenser (tonehøjde) over 20 kHz.

Lydtryk: Angives i dB SPL (sound pressure level). En tone ved 1 kHz og 0 dB SPL er netop hørbar. Lydtryk over 90 dB kan medføre høreskader.

Lyd hastighed i luft: 342 m pr. sekund.

Frekvens: Tonehøjde; angives i Hz.

Bølgelængde: Lyd hastighed/Frekvens.

Bølgelængden ved 100 kHz i luft: 3 mm.

Oktav: Forhold på 1:2 mellem to frekvenser.



Fig. 2. Wahlbergs Epaulette-flagermus (*Epomophorus wahlbergi*) og Baobabtræ-blomst (foto. M.D. Tuttle, Bat Conservation International).



Fig. 3. Hestekonæse (*Rhinolophus yunnanensis*) sender lydstråler gennem næsen (foto. M.D. Tuttle, Bat Conservation International).

paradis på jord; de fløj roligt rundt ved højlys dag, kun optaget af at befugte blomster og hinanden. Naturligvis havde de fjender, men i luften var de sikre, undtagen måske for nogle af deres egne, guldsmedene. Da så fuglene kom til, lærte en stor del af disse nye indvånere i lufthavet at tappe den vældige ressource, som de flyvende insekter udgør. Ikke så få insekter fandt nu (det vil sige i kridttiden) ud af, at fuglene ikke kan orientere sig i mørke, og ved at henlægge deres aktiviteter til nattetimerne, kunne de endnu engang finde et fristed. Det holdt dog kun i kort tid, målt med geologisk målestok, for nu kom flagermusene til, som netop i kraft af deres sonar kunne specialisere sig i de nataktive, efterhånden hårdtprøvede insekter.

Atter måtte insekterne til at finde modforholdsregler. Mange af disse bygger på, at flagermusene normalt bruger sådan en kraftig lygte, dvs. skriger så højt. Der kendes nu 7 forskellige insektfamilier – og listen er næppe komplet – med særlige sanseorganer, der er følsomme for flager-

museskrig. Flagermusedetektorer kunne man kalde disse organer, for ikke at forbinde dem med hvirveldyrenes øren, for insekternes ultralydsdetektorer har næsten ingen analyserende egenskaber. Enhver ultralyd vil få detektoren til at slå alarm og få dyret til at reagere, som om der var en flagermus i nærheden.

Det er interessant, at disse flagermusedetektorer er opbygget helt forskelligt hos de forskellige insektfamilier. Hos uglerne sidder de i brystkassen, hos målerne i bagkrøppen, hos visse spinde er det omdannede palper på hovedet, og hos guldøjerne er det en tranche-blære i vingen, der virker som ultralydsdetektor. Det viser, at disse organer, som jo har samme funktion, er udviklet uafhængigt i de forskellige grupper, og altså længe efter udspaltningen fra det fælles, hypotetiske ur-insekt. De primitive guldøjer, som kendes fossilt fra Tertiæret havde ikke disse ultralydsdetektorer, men dengang var der jo heller ikke noget at være bange for. Blandt de nulevende er kun en enkelt underfamilie uden dette specialiserede fjende-sporings udstyr.

Selvom insekternes flagermusedetektorer er meget simpelt bygget – der kendes arter med kun een sansecelle i detektoren – er de effektive. Lee Miller fra Biologisk Institut i Odense har vist, at en dværgflagermus' succes med fangst af guldøjer øges fra 10% til 50%, hvis guldøjernes ultralydsdetektorer er sat ud af kraft.

Ultralyd til skræk og advarsel

Den forsvarsadfærd, som ultralydsalarmen udløser er også højst varieret. Nogle flyvende insekter lader sig falde til jorden, andre svarer igen med ultralyd. Det sidste kan virke på flere måder. En af dem bygger tilsyneladende på, at flagermus bliver vældigt forskrækkede, når de udsættes for ultralydspulser, der ikke lige netop stammer fra dem selv. Det lærte jeg af en Langøret flagermus, som blev holdt i et stort bur. Den fik et så varieret fødeudvalg som muligt, og derfor fik den engang også en Dagpåfugleøje, som Langørede flagermus gerne fanger, når sommerfuglene sidder i dvale under tage på udhuse og andre steder. Men hver gang flagermusen nærmede sig, åbnede sommerfuglen blot sine vinger og viste det pragt-

fulde sæt af sorte og blå øjne på rød baggrund, og hver gang resulterede det i, at flagermusen gav et vældigt spjæt og trak sig tilbage med alle tegn på forskrækkelse. Nu ser flagermus ikke særligt godt, så det var næppe sommerfuglens øjne, den blev bange for. Istedet viste det sig, at samtidigt med, at sommerfuglen åbner vingerne, er der et lille område på vingen, der bukler, som når man klemmer en øldåse. Dette giver et kraftigt ultralydssmæld, og sammen med Lee Miller kunne jeg vise, at det var dette smæld, der virkede så voldsomt på flagermusen.

Andre insekter, f.eks. Bjørnespinderen, har et kemisk forsvar: de er ildesmagende; herom er både mennesker og flagermus enige, og Bjørnespinderen er da også så fair at annoncere det over for os med sine iøjnefaldende advarselsfarver. Problemet for Bjørnespinderen i forhold til flagermusene er, at det er svært at annoncere sin uspiselighed i sin ekkostruktur på en sådan måde, at flagermusene opgiver fangsten i tide. Bjørnespinderen har »løst« dette problem ved at sende ultralydsadvarselsklik tilbage, så snart deres detektorer har slået flagermuse-alarm. Annemarie Surlykke og Lee Miller har lavet forsøg, der viser, at flagermusene kun een eller ganske få gange sidder en sådan advarsel overhørig. Derefter har de lært at forbinde advarselsklikkene med noget ubehageligt.

Flagermusenes kontrastrategier

Den for flagermusene før så nemme opgave at skaffe sig til dagen og vejen, var med insekternes ultralydsdetektorer gjort meget vanskeligere. Flagermusene har tilpasset sig dette på flere forskellige måder. Mange, som f.eks. spidsørerne (fig. 9) – det er typer som Vand- og Damflagermus – holder sig til bytte som myg i vid forstand, der ikke har udviklet ultralydsdetektorer. Andre, som den Langørede flagermus, har blændet lykten: dens ultralydsskrig er mere end tusinde gange svagere end de fleste andre flagermus', så insekternes ultralydsdetektorer ikke når at slå alarm, før det er for sent. Flagermusens problem er naturligvis, at ekkoerne bliver tilsvarende svagere. Det er nærliggende at opfatte de monstrøst store øren (fig. 6) som en tilpasning hertil. Sikkert er det, at ørerne skal være intakte

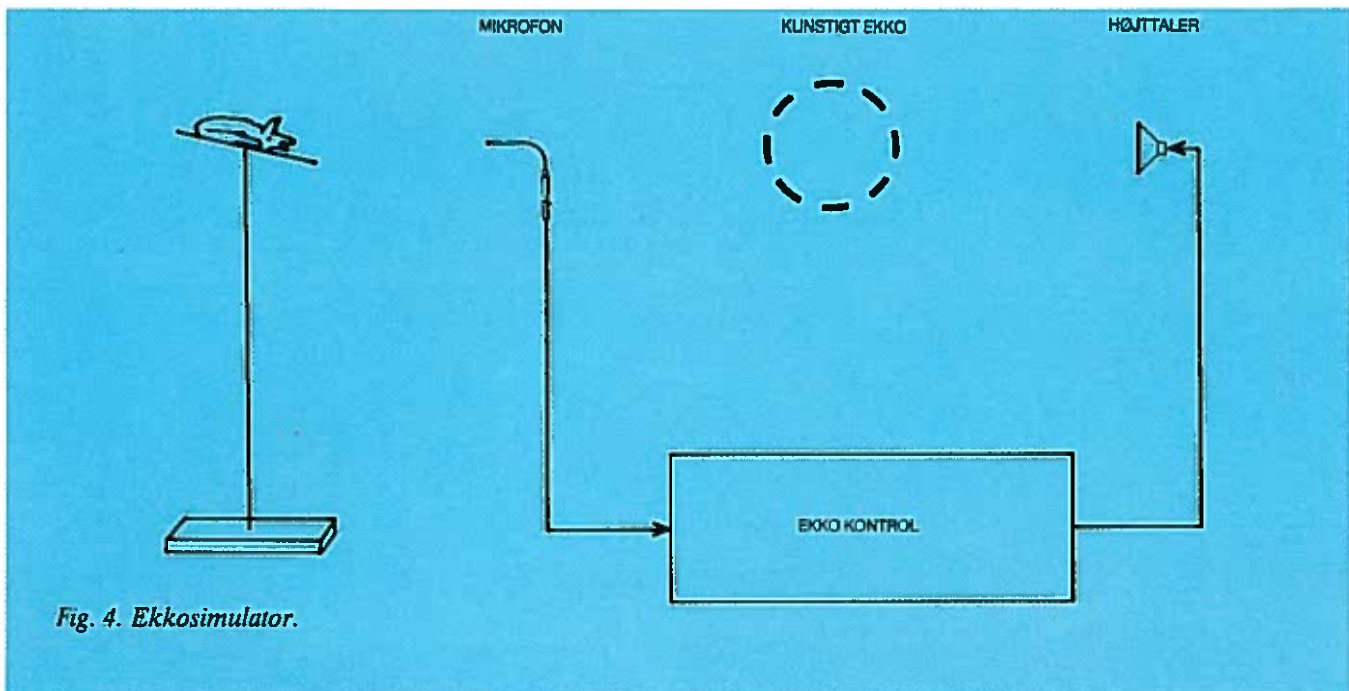


Fig. 4. Ekkosimulator.

og frit bevægelige for at dyret kan udnytte sin biosonar.

Flagermuse-sonars følsomhed

Der er dog både aerodynamiske og akustiske grænser for, hvor langt man kan gå ad den vej, som den Langørede flagermus har betrådt. De store øren kan ikke nær kompensere for den reduktion i ekkostyrke, som er følgen af at denne flagermus ikke skriger, men hvisker. Det rejser spørgsmålet om hvor følsom dens sonar er, det vil sige: hvad er det mindste objekt en flagermus kan opdage i en given afstand. Griffin udførte nogle forsøg med at lade denne og andre flagermusearter flyve gennem en labyrint af udspændte tråde i totalt mørke, og fandt, at den Langørede flagermus klarede sig næsten lige så godt som de højtråbende spidsørearter i den forstand, at den kunne opdage og undvige tråde med en diameter helt ned til 0.3 mm, hvor ekkøerne fra den Langørede flagermus' skrig var ekstremt svage.

I den efterfølgende analyse viste Griffin, at det ikke er ekkøernes absolutte størrelse, men deres størrelse i forhold til den allestedsnærværende baggrundsstøj, der er det væsentlige. Medens det er vanskeligt, men dog muligt at få et skøn over ekkøernes styrke, er baggrundsstøj i ultralydsområdet ikke målelig. Dertil kommer, at den skal

adderet til en ligeledes umålelig baggrundsstøj i flagermusens indre øre.

Griffin løste dette problem omtrent som Columbus løste sit med ægget: Omkring trådlabyrinten opstillede han en veritabel skov af 70 ultralydshøjtalere, der udsendte en hvid støj af betydelig – og målelig styrke. Flagermusene var meget lidt villige til at flyve igennem dette støjfelt, men de gjorde det dog. Deres evne til at undgå tynde tråde blev en anelse ringere, idet tråde tyndere end 0.5 mm voldte problemer. Nu kunne forholdet mellem ekko, signalet, og støjen beregnes, omend meget groft. Specielt for de Langørede flagermus var dette forhold så lille, at kun under antagelse af, at flagermusene anvendte de mest avancerede detektionsprincipper, som man iøvrigt ikke kendte biologiske eksempler på, ville deres præstationer kunne falde inden for, hvad der lod sig forklare ved de gængse naturlove.

Pulskompression

De detektionsprincipper, der her er tale om, var da Griffin lavede disse forsøg, netop blevet klarlagt i forbindelse med teoretiske undersøgelser af radar og sonars ydeevne. Her havde man opdaget, at en FM-puls, der som flagermusens stryger gennem et stort frekvensområde, har nogle egenskaber, der gør det muligt at komprimere den i



Fig. 5. Fiske-flagermus (*Noctilio leporinus*) (fot. M.D. Tuttle, Bat Conservation International).

tid og øge dens styrke tilsvarende. Et af de navne, man har givet den slags detektorer er pulskompressor.

Man kan anskueliggøre pulskompressorens virkemåde ved en optisk analogi. Det er velkendt, at et glasprisme bryder hvidt lys på en så-



Fig. 6. Langøret flagermus (*Plecotus auritus*) (fot. M.D. Tuttle, Bat Conservation International).



Fig. 7. Langøret flagermus (*Plecotus austriacus*) umiddelbart inden fangst af ugle (fot. K. Heblich).



Fig. 8. Fri-hale flagermus (*Tadarida brasiliensis*) på vej til nattens dont (foto. M.D.Tuttle, Bat Conservation International).



Fig. 9. Spidsøre (*Myotis lucifugus*) (foto. M.D.Tuttle, Bat Conservation International).

dan måde, at de enkelte farver, dvs. lys-bølgelængder, adskilles i et spektrum, strækkende sig fra rødt til blå. Dette skyldes, at lyshastigheden i glas er afhængig af bølgelængden: jo kortere bølgelængde, jo langsommere lyshastighed. Tænker man sig et ganske kort glimt af hvidt lys sendt igennem en glasstang, og at man var istand til at skelne farver lynhurtigt, ville man se, at lyspulsens efter at have passeret glasstangen til at begynde med ville være rød og ende med at være blå. Man vil altså få det kendte regnbuespektrum udbredt i tid i stedet for i rum. Den således spektralt ordnede lyspuls ville være meget længere end den oprindelige, hvide puls, og dens lysstyrke ville være tilsvarende mindre. Omvendt gælder, at hvis man sender en sådan spektralt ordnet puls gennem glasstangen, vil man få den kraftige, hvide puls gendannet. (fig. 1).

Det er denne sidste mekanisme, der udnyttes i

en pulskompressor. Radaren eller sonaren udsender ligesom flagermusene en puls, der er spektralt ordnet, og som varer relativt længe. De modtagne ekkoer sendes igennem et apparat med en bølgelængde – afhængig forsinkelse, der kan komprimere pulsen. Den støj, der uundgåeligt vil være overlejret ekkoet, har imidlertid alle tænkelige bølgelængder i en tilfældig rækkefølge, og det vil derfor være meget lidt sandsynligt, at denne støj vil kunne komprimeres eller summeres op. Der er derfor opnået en forbedring af signal/støjforholdet ved apparatets udgang. I tilgift er pulsen blevet kortere i tid. Det gør det nemmere at tidsfæste, hvornår et ekko ankommer, og øger dermed nøjagtigheden i afstandsmålingen til ekkogiveren.

Det har ikke skortet på forslag til, hvordan flagermusene kunne tænkes at lave denne pulskompression. Først i øresneglen, siden i de cen-

tralnervøse, akustiske centre i hjernen. Det første har kunnet afvises eksperimentelt, mens den sidste mulighed har været debatteret ivrigt i mere end 10 år. Selve ideen herom er fascinerende, fordi den giver en såkaldt simpel forklaring på FM-pulsens påfaldende, ordnede struktur. Man kan vise matematisk, at en detektor af denne type er ideel i den forstand, at den udnytter hver en bid af information i ekkoet ved at sammenligne det med et gemt billede, eller mønster, at det forventede ekko. I den optiske analogi i fig. 1 er dette mønster indkodet i glasstangens egenskaber; lyspulser, som ikke har præcis det mønster, der passer til stangen vil ikke blive komprimeret.

Det ideelle er et grænsefænomen, der altid påkalder sig interesse. Her ikke mindst fordi man står med en matematisk håndterlig model for, hvordan mønstergenkendelse kunne foregå i hjernen, en model, som hvis dens gyldighed accepteres, vil kunne udstrækkes til andre sanser. Men for at undersøge dens gyldighed, det vil sige dens evne til at forklare de observerede fænomener, måtte den eksperimentelle teknik forfines.

Kunstige ekkoer

Siden Griffins forsøg med de Langørede flagermus i støjfyldte trådlabyrinter, har udviklingen inden for elektronik og EDB naturligvis givet en række nye redskaber, og dermed nye forsøgsmuligheder. Der er nu så gode ultralydsmikrofoner og højttalere, at man kan lave ekkoer kunstigt med en ekkosimulator, se fig. 4. Flagermusene accepterer uden videre det kunstige ekko som om det kom fra en lille kugle midt imellem mikrofon og højttaler. At de ikke kan se nogen kugle, synes ikke at bekymre dem.

Jim Simmons, nu ved Brown University på Rhode Island, har udviklet ekkosimulator-teknikken til det for tiden mest benyttede redskab i biosonarforskningen. Det, at man »usynligt« og bogstaveligt talt med lynets hast kan flytte de kunstige ekkogivere frem og tilbage, har han brugt til at måle, hvor præcist flagermusene kan bestemme afstand med deres sonar. Resultatet er overraskende: En flagermus kan med ret stor sikkerhed afgøre, at en ekkogiver har flyttet sig så lidt som 1/10 mm frem eller tilbage mellem to

skrig! Disse forsøgsresultater er reproduceret i andre laboratorier, bl.a. ved universitetet i Tübingen. De har direkte betydning for forståelsen af de principper, bisonar arbejder efter, men de kan kun meget indirekte og med forsigtighed bruges i tolkningen af spørgsmålet om, hvordan jagende flagermus i naturen finder og fastholder det akustiske billede af deres bytte. Det er svært at forestille sig den biologiske relevans af submillimeter nøjagtighed i afstandsbestemmelsen til et flyvende insekt.

I mit laboratorium har vi benyttet ekkosimulator-teknikken til at afprøve nogle konsekvenser af pulskompressionshypotesen. Pulskompressoren virker kun forbedrende på signal/støjforholdet, når bølgelængderne hen igennem pulsen ændrer sig på en måde, der er afstemt til pulskompressoren. Hvis f.eks. den farvede lyspakke i fig. 1 vendes om, så det røde lys kommer først, vil lyspulsen blive dekomprimeret, dvs. strakt i tid og reduceret i styrke. Signal/støjforholdet vil blive forværret.

Med hurtige datamater kan man lave tilsvarende hokus pokus med flagermusenes lyd-pulser i en ekkosimulator. Hvis flagermusene faktisk bruger pulskompression, vil et ekko, som kommer tilbage »bagvendt« dvs. med de længste bølgelængder først, blive dekomprimeret og altså mindre hørbart (fig. 10). Vi trænede Dværgflagermus til at fortælle, om de kunne finde et kunstigt ekko fra et ganske bestemt sted på en baggrund af hvid støj, og målte hvor stort ekkoet skulle være i forhold til støjen, for at flagermusene ville rapportere, at der var et ekko. Derefter vendte vi ekkoet, så de lange bølgelængder kom først. Efter blot 3 forsøg accepteredes dette helt unaturlige ekko, som flagermusen med sikkerhed aldrig ville kunne opleve i naturen.

Det væsentligste var dog, at det signal/støjforhold, der var nødvendigt for at flagermusen ville rapportere at der var et ekko, ikke var ændret måleligt i forhold til det, som vi fandt for det retvendte ekko. Dette er i uoverensstemmelse med forudsigelserne ud fra pulskompressionshypotesen. Heller ikke i den absolutte værdi for signal/støjforholdet, der er tæt på det, andre pattedyr kan klare sig med, er der nogen støtte at hente for denne hypotese. Det betyder, FM-pulsens ord-

nede struktur atter er uforklaret, og at man må lede efter andre modeller for, hvordan centralnervesystemets mønstergenkendelsesprocesser foregår. Når resultaterne i dette forsøg fører til en anden konklusion end resultaterne fra Griffins forsøg med de Langørede flagermus skyldes det først og fremmest, at i simulatoren er flagermusene forhindret i at udnytte de ydre ørers vanskeligt beregnelige retningsvirkning til at bortfiltrere støj. At de kan det i mere naturlige situationer, hvor støjen kommer fra alle mulige retninger, er et eksempel på, hvordan naturen frembringer løsninger efter de forhåndenværende søms (ørers) princip, frem for at udvikle helt nye.

En akustisk fovea

Af og til bøjer naturen dog de forhåndenværende søm på måder, der giver helt nye muligheder. Generelt virker sneglen i pattedyrenes indre øre således, at de højeste toner analyseres i sneglens basis, de dybeste i dens top, med de mellemliggende toner smukt ordnet ind imellem. Denne orden giver sig udslag i, at en oktav strækker sig over stort set den samme afstand i sneglen, hvad enten den ligger omkring det dybe eller det høje C. Men sådan er det ikke hos Hestekonæserne. Her er det område, der analyserer tonehøjder mellem 82 og 86 kHz kraftigt ekspanderet. Nervefibrene fra dette område udgør 20% af samtlige fibre til øresneglen, og det fylder mere end en 1/2 vinding. Normalt vil en sådan strækning dække en hel oktav, her fra 82 til 164 kHz. Det viser sig også, at disse dyr har en tonehøjdeskelneevne i det pågældende område, der er een størrelsesorden bedre end andre pattedyrs. Man har kaldt denne specialisering for en akustisk fovea, analogt til øjets højtopløsende gule plet.

Hestekonæsernes sonar pulser er afstemt til dette øre. I modsætning til FM-flagermusenes korte glissade (sweep), er hestekonæsernes pulser lange, 20 til 100 msec, og frekvensen ligger fast på en ganske bestemt tonehøjde, der – ikke overraskende – falder nogenlunde midt i den akustiske fovea. Først til sidst i skriget er der et ganske kort sweep. Disse lyde udsendes iøvrigt gennem næseborene, – hvad der i sin tid forvirrede Spallanzani ganske meget. Afstanden mellem næseborene er præcis en 1/2 bølgelængde;

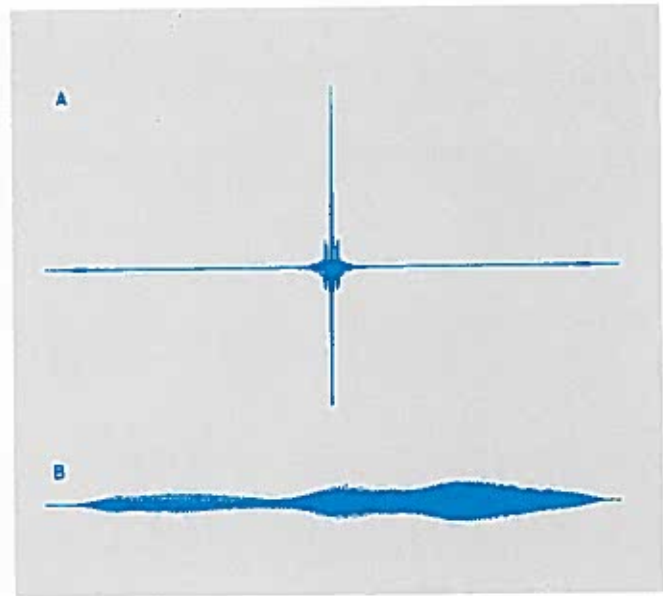


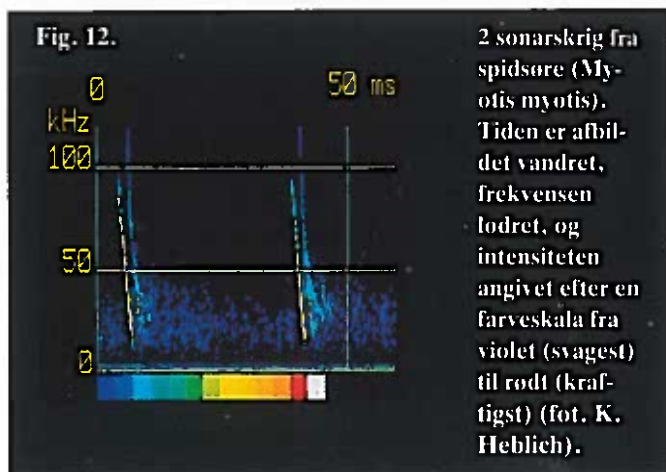
Fig. 10. Puls-kompression af flagermuse-ekko.
A: normalt ekko.
B: bagvendt ekko.

dette skaber en meget retningsbestemt lydstråle ved interferens. Retningsvirkningen øges yderligere af de påfaldende hudfolder, der omgiver næsen, og som gruppen har fået navn efter (fig. 3).

H.-U. Schnitzler, nu i Tübingen, var den første, der kunne måle frekvensen af Hestekonæsernes lyd-pulser så nøjagtigt, at han også kunne se et mønster i variationerne. Når dyret ikke flyver, hænger det med hovedet nedad og scanner omgivelserne med sine lange lyd-pulser. Fra individ til individ kan der være lidt forskel i lyd-pulsernes frekvens, men for det enkelte dyr skal der måles med en nøjagtighed på mindst 4 betydende cifre for at se variationer. Så snart dyret flyver, sænker det frekvensen, og jo mere, jo hurtigere det flyver. Schnitzler var i stand til at vise, at frekvenssænkningen nøjagtigt kompenserede for den tonehøjdeændring i ekkoerne, der skyldes dyrets fart. Fænomenet er velkendt fra udrykningskøretøjer, hvis alarmsignal lyder som om det har en højere tone, når det nærmer sig, og en lavere, når det fjerner sig. Denne fart- og retningsbetingede tonehøjdeændring kaldes Doppler-effekten. Tilsyneladende er det vigtigt for Hestekonæsen, at ekkoet falder nøjagtigt midt i den akustiske fovea, hvor følsomheden er størst. Men hvorfor?



Fig. 11. D'Orbigny's flagermus (*Tonatia sylvicola*) med løvgræshoppe (foto. M.D. Tuttle, Bat Conservation International).



Farvelagte ekkoer

De meget langvarige lyd-pulser med konstant frekvens, som disse dyr udsender, er meget lidt egnede som sonar-pulser, hvis opgaven er at finde afstanden til et bytte, og orientere dette i forhold til omgivelserne. Men det er eminent godt egnet til at finde et bytte, der bevæger sig i forhold til omgivelserne. Disse vil returnere et ekko på samme frekvens, medens ekkoerne fra ting der bevæger sig vil være dopplerskiftet. For igen at bruge en optisk analogi kan man sige, at ekko-billedet er blevet farvelagt: det, der bevæger sig har fået en anden farve end baggrunden. Kom-



Fig. 13. Hjerte-næset flagermus (*Cardioderma cor*) på billefangst (foto. M.D. Tuttle, Bat Conservation International).



Fig. 14. Frø-ædende flagermus (*Trachops cirrhosus*) (foto. M.D. Tuttle, Bat Conservation International).

mer det nærmere, bliver det blå, fjerner det sig, bliver det rødt, svarende til, at bølgelængden bliver større. Og det interesserer helt givet flagermusen. Chancen for, at det er et potentielt fødeemne, der med skrigende (bogstaveligt talt) farver stikker af fra de grå omgivelser, er høj. Specielt er hestekonæserne ferme til at opdage insekter, der siddende i vegetationen varmer op før flyvningen ved at svirre med vingerne. Vingernes store flader er gode ekkogivere, og på grund af deres bevægelser er der rimelige chancer for, at de på eet eller andet tidspunkt i en vingecyklus kommer til at stå vinkelret på lydretningen, således at de kan returnere et kraftigt, rytmisk og stærkt farvet ekko. Selv langsomme vingeslagsrytmer vil kunne opdages, fordi pulserne varer så relativt længe.

Såsnart et bytte er opdaget, korter Hestekonæsen pulserne af og overgår derved til en sonar-type, der mere minder om de andre flagermus'. Simmons har lavet forsøg med Hestekonæser i en speciel type ekkosimulator, hvor han kunne kontrollere forskellen mellem flagermusens udsendte skrigs tonehøjde og ekkoets. Såsnart denne forskel varierede, ændrede flagermusen tonehøjden af sit eget skrig på en sådan måde, at det kunstige ekko altid kom tilbage med den samme tonehøjde (83.01 kHz) inden for en tolerance på 0.07%, uanset hvor meget forsøgslederen ændrede tonehøjdeforskellen. Denne regulering af tonehøjde er en størrelsesorden bedre end det, en professionel musiker kan præstere. Ved kraftige, opadgående skift blev forsøgsdyrene til at begynde med skræmte, og fløj væk. Dette er ret taknemmeligt at tolke: Det må virke som om hele verden er på kollisionskurs. Men iøvrigt var det tydeligt, at Hestekonæsens opmærksomhed kun blev vakt, når det kunstige ekko var »farvet«.

Hestekonæsernes Doppler-sonar er et godt eksempel på, at det ikke er mængden af informationer, men kvaliteten af dem det kommer an på.

Ligheden med mange dyrs synssans er påfaldende. Visse springpadder f.eks., er praktisk taget blinde for ting, der ikke bevæger sig, og det samme er i nogen grad tilfældet for vort eget perifere syn.

Flagermuse-nicher

Der er godt 700 arter af flagermus, der orienterer sig med biosonar. Gruppen er den næststørste inden for pattedyrene, kun overgået i artsantal af gnaverne. At kunne flyve, og at kunne gøre det i mørke, er tydeligvis noget, der åbner op for en bred vifte af nicher. Hovedparten af flagermusene finder føden blandt insekterne, både de flyvende og de kravlende (fig. 13), men de større flagermus med vingspænd mellem en halv og en hel meter tager også små hvirveldyr som gnavere, frøer (fig. 14), ja selv andre flagermus. Både frøerne og de flagermus, der bliver fanget af de større flagermus, er bytte, der er nemt at finde, fordi det selv udsender lyde; her kræves ingen aktiv sonar. Der er også eksempler på flagermus, der har specialiseret sig i at fange små fisk. Flagermusesonaren kan ganske vist ikke »se« igennem vand, men fisk tæt ved overfladen vil danne små krusninger, som giver gode ekkoer, og det er nok til at fortælle flagermusen, hvor det kan betale sig at slå til med de lange, sylespidse kløer (fig. 5).

Endeligt er der en hel del tropiske flagermusearter, som er vegetarer. De lever af nektar, honning og pollen. Deres levevis er i mangt og meget som kolibriernes (forsiden), men kolibrierne er på dagholdet, flagermusene på natholdet. Mange planter og træer har tilpasset sig denne nye mulighed for befrugtning og frøspredning, f.eks. Baobab-træet (fig. 2) og de vilde bananer. De blomstrer kun om natten; blomsterne sidder frit på lange stilke, der gør dem iørefaldende for flagermusenes sonar.

Verden ville se anderledes ud, hvis flagermusene ikke havde lært at mestre den 6'te sans.