

Guldsmed og mariehøne har forskellig frekvens på vingeslagene.
Foto: Colourbox.



VINGESLAG PÅ FORMEL

Ved rent teoretiske overvejelser kan man udlede en simpel ligning, der forudsiger, hvor hurtigt en fugl slår med vingerne for at holde sig i luften. Måledata fra flere end 400 flyvende dyr viser, at denne ligning gælder generelt på tværs af arter, kropsstørrelser og flyvestil.

Forfatterne



Tina Hecksher er lektor i fysik
tthe@ruc.dk



Jens Højgaard Jensen er lektor emeritus i fysik



Jeppe Dyre er professor i fysik

Alle ved Roskilde Universitet

Når en fugl flyver, så kan hastigheden, hvormed den slår med vingerne, forudsiges af en simpel matematisk ligning. Og det gælder ikke bare fugle, men tilsyneladende alle flyvende dyr – ja, endda også en hval, der slår med halefinnen. Ligningen relaterer vingeslagsfrekvens til kropsmasse og vingeareal, og biologiske data viser, at ligningen gælder uanset dyrets størrelse eller flyvestil.

Dette resultat har vi for nylig publiceret i tidsskriftet *PLoS ONE*. Andre forskere har gennem tiden også søgt efter universelle mønstre i dyrs flyvning, og både fysikere og biologer er kommet med bud på formler, der beskriver vingefrekvensen. Men disse tidligere forsøg har alle delvist været baseret på empiriske observationer, og ingen har før søgt at generalisere dem på tværs af så mange arter.

En formel bliver til

I vores udledning af formelen, har vi brugt såkaldt dimensionsanalyse. Kort fortalt går det ud på teoretisk at analysere konsekvenserne af, at de to sider på hver side af lighedstegnet i en ligning skal have samme dimension – dvs. de skal repræsentere samme slags fysiske størrelse.

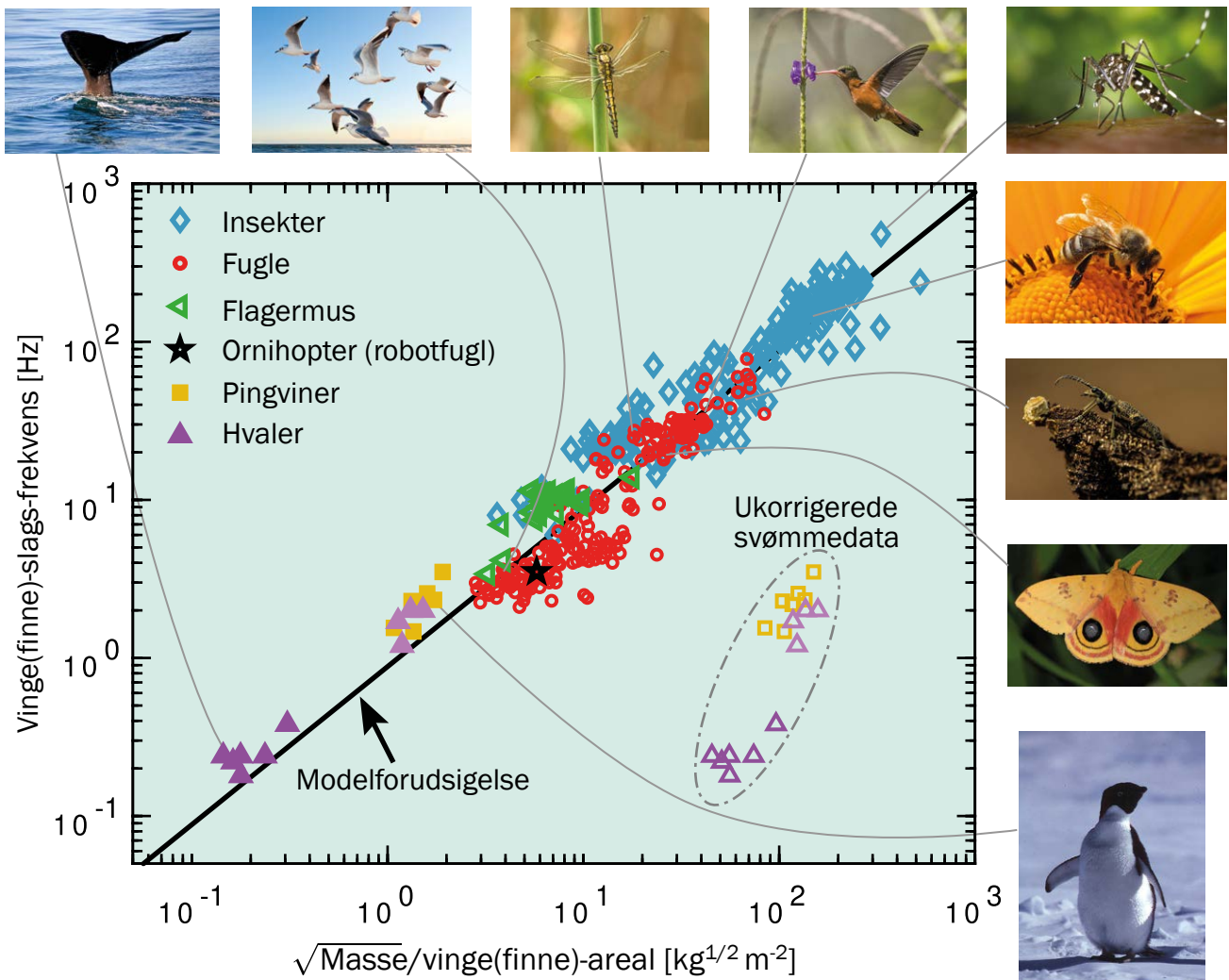
Vores argument var, at vingeslagsfrekvensen er den samme, når en fugl står stille i luften, og når den flyver. For at holde sig svævende i luften skal et stillestående dyr generere en opad-rettet kraft, der balancerer tyngdekraften, og det gør dyret ved at presse luft nedad med sine vinger. Heraf følger, at de størrelser, der betyder noget, må være vingeslagsfrekvensen (hvor hurtigt dyret slår med vingerne), vingearealet (som bestemmer, hvor meget luft, der presses ned per vingeslag), luftens densitet (der bestemmer hvor stor impuls hvert vingeslag genererer) samt forskellige størrelser som

former og vinkler, der beskriver det enkelte dyrs vingeform og flyvestil.

Da former og vinkler er dimensionsløse størrelser (dvs. de har ikke en fysisk enhed), slog vi disse størrelser sammen til en enkelt proportionalitetskonstant. De resterende størrelser, dvs. vingefrekvens, vingeareal og luftdensitet, kan kombineres på præcis én måde, der giver en kraft. Ved at antage, at den dimensionsløse proportionalitetskonstant er den samme for alle flyvende dyr og ignorere mindre variationer i lufttæthed og gravitationsfeltstyrke, nåede vi frem til, at vingefrekvensen er proportional med kvadratroden af massen divideret med vingearealet, eller udtrykt formelt:

$$f \propto \sqrt{m}/A$$

Vores studie var inspireret af et eksamensspørgsmål til et kursus, der går ud på at lære eleverne at “tænke som fysikere”. Eksamensspørgsmålet bad de studerende forklare,



Efter Jensen, J.H., Dyre, J.C & Hecksher, T. (2024). PLoS ONE.

Plot af måledata for vingeareal, masse og vingeslagsfrekvenser for forskellige dyr. Det fremgår, at data ligger tæt omkring forudsigelsen baseret på vores formel. Data for svømmende dyr skal korrigeres for opdrift samt forskellen i densitet mellem vand og luft. De ukorrigerede data er her vist med åbne symboler. Med de beskrevne korrektioner rykker datapunkterne ind på samme linie som flyvende dyr.

hvor hurtigt en fugl skal slå med vingerne for at holde sig svævende i luften – et spørgsmål, man kan nære sig et svar på ved netop at bruge dimensionsanalyse. Efter eksamen blev vi nysgerrige på, om den udledte formel passede med data.

Formel passer med måledata

For at teste gyldigheden af vores formel indsamlede vi 414 datapunkter fra publicerede undersøgelser, der rapporterer vingeareal, masse og vingeslagsfrekvenser for fugle lige fra svaner til kolibrer, flyvende insekter såsom bier, møl, guldsmede, biller og myg samt flagermus og en enkelt flaksende robot kaldet en ornhopter. Vi inkluderede også data fra hvaler og pingviner. I modsætning til fisk, som bruger luftfyldte blærer til at regulere deres position

i vandet, har disse dyr en positiv opdrift og må derfor svømme for at forblive under vandet. Fysikken, der styrer deres finne-frekvens, bør derfor svare til fysikken for vingeslagsfrekvenser, bortset fra en korrektionsfaktor for de forskellige tætheder af luft og vand samt korrektion for opdriften – dyr “vejer” mindre i vand end i luft.

Da vi plottede data for alle dyrene, lå de alle nydeligt på den forudsagte rette linje med lille spredning i datapunkterne. Det betyder, at flyvende dyr på trods af store fysiske forskelle har udviklet sig på en måde, der holder forholdet mellem deres masse, vingeareal og vingeslagsfrekvens relativt konstant.

Umiddelbart var vi overraskede

over, at dataene falder på samme linje. For selvom det grundlæggende forhold følger af fysikken, kunne proportionalitetskonstanten i princippet godt være forskellig for forskellige vingeformer og flyvestile.

Man kan undre sig over, at ingen tidligere har afsløret dette simple forhold. Men det kan måske skyldes undersøgelsens tværfaglige karakter. Vores formel er teoretisk udledt baseret på fysikprincipper, og den anviser også, hvordan man skal sammenligne svømmende/dykkende dyr i samme plot som de flyvende dyr. Denne tilgang er mindre almindelig blandt biologer, der ofte arbejder mere empirisk. Det kræver således en kombination af fysik og en stor mængde empiriske data at nå frem til vores resultat. ■

Videre læsning:
Forskernes artikel: Jensen, J.H., Dyre, J.C & Hecksher, T. (2024): Universal Wing- and Fin-beat Frequency Scaling. PLoS ONE. doi.org/10.1371/journal.pone.0303834

Læs mere om dimensionsanalyse i Aktuelt Naturvidenskab: Jensen, J.H. og Hecksher, T. (2018): Fysikernes hemmelige våben. Aktuelt Naturvidenskab, nr. 4.

Til denne artikel er der også ekstrap materiale, hvor netop eksemplet med en fugls baskende vinger er gennemgået i større detalje.

Forskningen, som er omtalt her, er støttet af Villum Fonden.