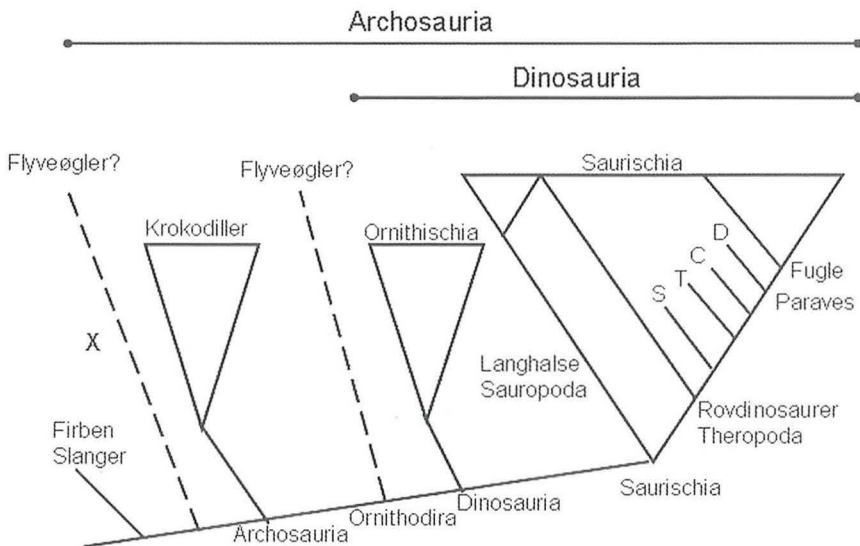


# TETRAPTERYX OG FLYVNING

## - LIDT OM FLYVNING OG AERODYNAMIK

Kasper Hansen og Niels Bonde

Som fortsættelse af vores artikel i VARV 2005,4 om 'firvingede dinosaurer' vil vi her skitsere nogle ideer om flyveevnen og dens opståen baseret på sammenligninger af *Microraptor* (en avanceret rovdinosaur fra gruppen Dromaeosauria) med øglefuglen *Archaeopteryx* og andre tidlige slægtinge til fuglene, samt de noget fjernere beslægtede flyveøgler. Alle hører de til den store gruppe af de nært beslægtede grupper flyveøgler og dinosaurer inklusive fugle, som har fået navnet Ornithodira. Dette betyder 'dem med fugleagtig hals' på baggrund af den karakteristiske S-krummede hals, hvilket kan ses på nogle af halshvirvlernes lidt 'skrå' ledflader mod hinanden (som bevirker krumningen). Enkelte andre skelettræk er også indicier på dette slægtskab og er avancerede ligheder imellem de to grupper, træk som krokodiller ikke har udviklet. Der er dog et par forskere, der mener, at flyveøglerne er mere primitive former spaltet fra archosaurernes (gruppen der omfatter både flyveøgler, dinosaurer, fugle og krokodiller) stamtræ, førend krokodiller og dinosaur-fuglegruppen blev adskilt (figur 1).



Figur 1. Slægtskabsforhold (stamtræ) for Dinosauria (inklusive fugle) og de andre archosaurgrupper, flyveøgler og krokodiller. Bemærk de to forskellige modeller for flyveøglernes placering.

For at få en idé om, hvorvidt den tidligere beskrevne firvingede *Microraptor gui* (Tidlig Kridt, Liaoning, NØ-Kina), kunne flyve eller svæve igennem luften, er der sammenlignet aerodynamiske profiler og opstillet nogle enkle beregninger, som giver et simplificeret udtryk for dyrets evner i luften. Men først må vi se lidt på, hvorledes flyvning hos hvirveldyr i det hele taget foregår (insekters vinger fungerer på en helt anden måde). For hvirveldyrenes vedkommende findes der teknisk set fem forskellige typer bevægelse gennem luft:

1. **Frit fald**, defineret som et fald eller en nedstigning på mere end 45 grader i forhold til en vandret akse. Denne type bevægelse kan stort set alle dyr udføre, med større eller mindre elegance, og de bedst egnede er i besiddelse af et stort overfladeareal og en lille egenvægt.

2. **Svævning**, er en mere sofistikeret form for frit fald, hvor vinklen på nedstigningen er mindre end 45 grader i forhold til en vandret akse. Resultatet er, at 'svævere' kommer betydeligt længere i vandret retning og lander blødere end de 'frit-faldende'. Svævning er ret almindeligt blandt krybdyr og pattedyr. En strømlinet krop og et 'airfoil design' (aerodynamisk udformede bæreplaner), der skaber løft, holder simpelthen dyret længere tid i luften.

3. **Egentlig flyvning**, hvor dyret 'basker' eller 'slår' med vingerne, når det bevæger sig igennem luften. Denne vingebevægelse skaber en kraft, der driver organismen fremad og holder det i luften på trods af tyngdekraft og luftmodstand. Egentlig flyvning er opstået mindst tre gange inden for hvirveldyrene: hos fuglene, flagermusene og hos de uddøde pterosaurer - også kendt som flyveøgler.

4. **Avanceret svævning**. Kun de store flyveøgler og nogle få slags fugle som stormfugle, måger, kondorer, gribbe og mursejlere kan udføre avanceret svævning. Med en særlig morfologi og vingebygning samt visse fysiologiske tilpasninger kan disse organismer holde sig i luften ved hjælp af opdriften fra stærk vind eller opstigende varm luft - på samme måde som en svæveflyver - og altså uden at bevæge vingerne synderligt.

5. **'Hovering'**. Kolibrier, isfugle og mange rovfugle er i stand til at opretholde den same position i luften over længere perioder, bl.a. mens de fouragerer. Fuglene kan generere kraft nok til at udføre denne elegante manøvre ved at bevæge vingerne ekstremt hurtigt frem og tilbage - ofte i ottetals-form. Visse kolibrier slår op til 80 vingeslag i sekundet under hovering, og det siger sig selv, at denne type flyvning er ekstremt energikrævende.

Når man umiddelbart betragter *Microraptor gui* virker det mest sandsynligt, at den hører til i kategori 2, og altså er en 'svæver'. Den har en strømlinet krop og et tydeligt 'airfoil design'. De asymmetriske svingfjer på vingerne er en yderligere indikation på, at vi har med en forholdsvis veludviklet 'svæver' at gøre. Måske har forlemmerne

udført egentlige vingeslag, mens det er vanskeligt at forestille sig baglemmerne brugt til egentlige vingeslag, for lårbenets led mod bækkenet vender så helt galt. Selvfølgelig har den dog kunnet styre med baglemmerne hængende skråt nedad, og tilmed har den et langt 'haleror' (se forsiden).

Der er lavet en undersøgelse af bl.a. *Sinornithosaurus* flyveegenskaber (en ca. en meter lang fjerdækket dromaeosaur også fra Liaoning) der menes at kunne svæve (figur 2), her sammenlignet med *Archaeopteryx* som ifølge de fleste eksperter fløj udmærket uden at kunne hæve armene over horisontalt (tabel 1). Vores beregninger af *Microraptor guis* flyvedata (wing loading og aspekt ratio) er ligeledes indført i tabel 1.

Til sammenligning er undersøgelser af flyveegenskaberne af den nulevende *Phasianus* (fasan) indført i tabel 2. Vores beregninger af flyvedata for den enorme flyveøgle *Quetzalcoatlus* og *Falco peregrinus* (vandrefalken) er også indført i tabellen.



Figur 2. *Sinornithosaurus* med meget korte svingfjer springer og fanger et insekt. Bemærk dromaeosaurens karakteristiske store hævede klo på 2. tå.



	Sinornithosaurus	Microraptor gui	Microraptor gui	Archaeopteryx
		Kun 'forvinger'	Fire vinger	
Vingefang	0,92 meter	0,8 meter (for- og bagvinger)	1,51 meter	0,58 meter
Vingereaal	0,049 kvm	0,074 kvm	0,14 kvm	0,047 kvm
Kropslængde	0,35 meter	0,175 meter	0,175 meter	0,12 meter
Vægt	4,5 kg	2,0 kg	2,0 kg	0,4 kg
Aspekt ratio	17,3	8,6	16,3	7,2
Wing loading	91,8	27	14,3	8,5

Tabel 1. Aspekt ratio: mål for vingefangformningen, defineret som vingefang<sup>2</sup>: Vingereaal. Wing loading (wl): mål for relativ størrelse af vingen, defineret som kropsvægt:vingereaal (lav wl = lav fart, god manøvrering, hurtig stigning, reduceret agility) Archaeopteryx data er modificeret fra Rayner; 'The Beginnings of Birds' (1984). Beregninger af Microraptor gui's vingefang, vingereaal og kropslængde er baseret på figur 3.

	Quetzalcoatlus (Flyveøgle)	Falco peregrinus (Vandrefalk)	Phasianus (Fasan)
Vingefang	13,0 meter	1,0 meter	0,72 meter
Vingereaal	24,5 kvadratmeter	0,21 kvadratmeter	0,088 kvadratmeter
Kropslængde	4,5 meter	0,25 meter	0,28 meter
Vægt	100 kg	1,1 kg	1,2 kg
Aspekt ratio	6,9	4,8	4,5
Wing loading	4,1	5,2	13,6

Tabel 2. Aspekt ratio og andre termer: Se tabel 1. Phasianus data er fra Chatterjee 'The Rise of Birds' (2002).

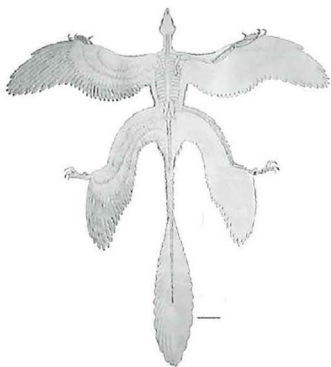
Med hensyn til wing loading ses det, at *Microraptor gui* og især *Sinornithosaurus* var mere 'klodsede' i luften end *Archaeopteryx*, som har det klart laveste mål indenfor wing loading.

*Microraptor guis* fire vinger har givet et væsentligt længere svæv end det, *Sinornithosaurus* var i stand til – måske må man betragte *Sinornithosaurus* som en mellemting mellem flyvekategori 1 og 2, den var under alle omstændigheder uhyre ringe til at svæve.

Med hensyn til aspekt ratio, som er et mål for den effektive vingefangformning, har svævende organismer generelt høje værdier. Lave værdier observeres ved avanceret svævning eller hos dyr, der bruger hurtig flugt. Det skal bemærkes, at man på et tidspunkt kan opnå så høje værdier, at der ses den modsatte effekt – man går fra at svæve

til et decideret frit fald. Forestiller man sig et menneske med et vist 'vingefang' fra fingerspids til fingerspids, kombineret med et ekstremt lille vingereale, vil man hurtigt opnå meget høje værdier (sandsynligvis på over 20), og så mister man hurtigt evnen til at svæve. Den præcise grænse mellem svævning og frit fald er vanskelig at præcisere og er bl.a. afhængig af hastigheden organismen bevæger sig med, men den findes nok et sted mellem værdierne 15-18 i aspekt ratio.

Afhængig af, hvordan man beregner aspekt ratioen på *Microraptor gui's* to par vinger (figur 3), vil værdien svinge imellem 8,6 og 16,3. Det skal understreges at målet for beregningerne i praksis er taget fra figur 3, men i virkeligheden blev bagvingen holdt noget skråt nedad under svævning, så derfor havde den et noget mindre effektivt areal, men denne reduktion har vi ikke beregnet. Det mest realistiske er måske at estimere en slags gennemsnit: 12,5, som ligger mellem værdierne for *Sinornithosaurus* og *Archaeopteryx*. Bruger vi dette skøn og sammenholder det med de morfologiske karakterer, må vi konkludere, at *Microraptor gui* var udmærket til at svæve, væsentligt bedre end *Sinornithosaurus*, men at den nok ikke var i stand til at udføre egentlig flyvning.

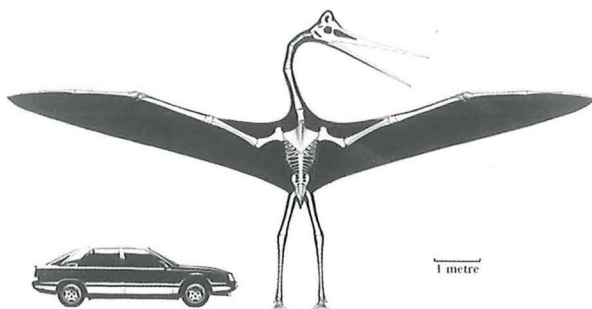


Figur 3. *Microraptor gui* i silhuet, skala: 6 centimeter.

Verdens måske hurtigste fugl, vandrefalken, som kan dykke med op til 300 kilometer/time – har meget imponerende flyveegenskaber, som tydeligt fremgår af værdierne i tabel 2. Interessant er det også, at fasanen har meget lav aspektratio (4,5) som især må være en fordel under hurtig flugt fra rovdyr! Mest overraskende er det nok, at den enorme flyveøgle *Quetzalcoatlus* med en vægt på omkring 100 kg havde den laveste wing loading værdi overhovedet (figur 4). Det må have været et fantastisk syn at se dette 'uhyre' komme flyvende igennem luften med sit vingefang på 13 meter – til sammenligning havde det britiske jagerfly Spitfire fra Anden Verdenskrig, et vingefang på kun lidt over 11 meter.

## DEBATTEN OM MICRORAPTOR GUI

Der er dog flere ubesvarede spørgsmål omkring *Microraptor gui*. Hvordan brugte de egentlig deres fire vinger? Man må formode, at det rent anatomisk ikke har været



Figur 4. Den gigantiske flyveøgle *Quetzalcoatlus* fra Sen Kridt, her rekonstrueret sammen med en personbil.

muligt for den at baske med alle fire vinger samtidigt. Dette støtter teorien om svævning frem for flyvning. Der er også tvivl om, hvordan bagbenenes bevægelsesmønster var, både med hensyn til at kunne gå på jorden, men også med hensyn til, hvordan bagvingen foldedes ud under svævning. Måske kunne baglemmerne blot hænge lidt skråt udad til styring?

En ekspert inden for ornitologiens verden, Alan Feduccia, har dog i første omgang været meget tilbageholdende med sin begejstring for fossilerne af *Microraptor gui*. Han erindrer historien om den forfalskede *Archaeoraptor*, også fra Liaoning i Kina, der i 1999 blev præsenteret som det nyeste 'missing link', men viste sig at være en forfalskning. Det omfattede det meste af en primitiv fugl med tænder – senere beskrevet som *Archaeovolans repatriatus* - hvorpå der var klistret en lang, stiv hale fra en 'raptor', faktisk en påviselig modplade til et andet *Microraptor* fossil. De afbildede *Microraptor gui* fossiler ser dog foreløbigt ud til at være gode og solide - uforfalskede - fossiler.

Så sent som i 2005 publicerede netop Alan Feduccia en større afhandling hvor han, ikke for første gang, stiller spørgsmål ved fuglenes oprindelse. Han konkluderer bl.a., at adskillige af de kinesiske dinosaur-fossiler fra Liaoning ikke er bevaret med fjer, men at der tilsyneladende er tale om collagenfibre i huden i stedet. Herudover inddrager han udviklingsbiologiske undersøgelser, der kort fortalt beskriver, hvorledes fingrene hos nulevende fugle dannes og nummereres. I forhold til de oprindelige fem fingre er alle palæontologer enige om, at mere avancerede rovdinosaurer, f.eks. også dromaeosaurer, har nr. 1-2-3 tilbage. Resten - nr. 4-5 - er reduceret bort i løbet af evolutionen. Feduccia mener, at hans undersøgelser af nulevende fuglefostre tydeligt viser, at fugle i dag har fingrene 2-3-4 tilbage, fordi de i fosterstadiet mister de svagt anlagte bruske til finger 1 og 5. Med disse resultater mener han at kunne afvise hypotesen om, at fuglenes oprindelse findes indenfor avancerede rovdinosaurer som Paraves, og at udspaltningen af fugle i stedet for må ligge længere tilbage i tiden. Ud fra en sammenligning med *Archaeopteryx* bliver *Microraptor gui* i samme



artikel noget overraskende udnævnt til en 'flyvende non-theropod', og altså slet ikke en traditionel rovdinosaur, sådan som dromaeosaurerne ellers normalt bliver opfattet baseret på analyser af hundrede af skeletkarakterer.

Feduccia og hans medforfattere står foreløbigt forholdsvis isoleret i debatten om fuglenes oprindelse, og der synes da også at være flere problemer med deres undersøgelser. Med hensyn til nummereringen af fingre er det i dag umuligt at efterprøve fosterudviklingen hos uddøde dinosaurer, og derfor står man med nogle palæontologiske undersøgelser der siger ét, og nogle udviklingsbiologiske undersøgelser der siger noget andet. Det skal i denne sammenhæng nævnes, at der også findes resultater fra udviklingen af fingre hos fostre af mus, som indirekte understøtter den klassiske hypotese om nummereringen 1-2-3 for fugle, og dermed modstrider Feduccias resultater. Det synes også noget mærkværdigt, at han nu både accepterer, at fossilerne af *Microraptor gui* er ægte, og altså ikke er forfalsket som først antaget og samtidigt mener, at den er dækket af fjer og yderligere nærmest definerer den som en fugl. På den anden side - helt uproblematisk - afviser han tilstedeværelsen af fjer hos *Sinornithosaurus*, *Sinosauropteryx* og *Caudipteryx*, alle kendte og velundersøgte fossiler af dinosaurer fra Liaoning, som stort set alle andre palæontologer beskriver som delvist dækket af fjer eller 'protofjer'. Og Feduccias nye hypotese om collagen i stedet for fjer kan da heller ikke let efterprøves på fossilerne. Faktisk kan man dog ved meget usædvanlig bevaring være så heldig, at hornstof tilsyneladende er bevaret. En lille meget afvigende rovdinosaur, Shuuvia, fra Mongoliets sene Kridt har i sandsten bevaret nogle tynde, hule 'rør' på kroppen, og stoffet i dem viser sig at reagere immunologisk på samme måde som fjer fra nulevende ænder – det er vel det tætteste, man kan drømme om at komme på et 'bevis' for, at det faktisk er fugle-keratin, og dermed simple 'protofjer'.

Andre forskere som Richard O. Prum og M.V. Rayner er af den opfattelse, at de asymmetriske fjer blev brugt i en aerodynamisk funktion, højst sandsynligt til at svæve med. Rayner har sågar udtalt, at hvis de foreløbige undersøgelser af *Microraptor gui* er korrekte, så er disse fossiler de mest betydningsfulde inden for fuglenes udviklingshistorie siden *Archaeopteryx*. Dog understreger en anden ekspert Kevin Padian, at det må have været umuligt for *Microraptor gui* at baske med vingerne, især de bagerste, så egentlig flyvning har der ikke været tale om – kun svævning – og han rejser nogen tvivl om, hvorvidt de lange fjer virkelig sidder på fødderne, sådan som det umiddelbart ser ud til på de fleste afbildede rekonstruktioner. Selvom Beebe forudsagde, at der havde eksisteret en fire-vinget fugl, må vi i dag konkludere, at stamformen til fuglene og dromaeosaurerne ikke er fundet fossilt. *Microraptor gui* er det eneste fire-vingede hvirveldyr til dato (figur 5).

*Microraptor gui* kunne sandsynligvis svæve eller glide gennem luften, og det er ikke usandsynligt at små fjerede rovdinosaurer bevægede sig rundt i træerne, og så



Figur 5. *Microraptor* som 'natflyver' med bytte rekonstrueret af Julius Csotonyi (gengivet med tilladelse). Om *Microraptor gui* virkelig har kunnet hæve vingerne så højt, er meget tvivlsomt. Føddernes fjer er korrekt gengivet som meget lange på de nedadrettede 'ror'. Halen er tegnet uden de lange yderste halefjer.

er der ikke så langt til flyvning, hvis man som udgangspunkt har *Microraptor guis* kropsbygning.

I det nordøstlige Kina er der for nylig fundet en fugl med fjer på underbenet og låret ligesom hos *Archaeopteryx*, men dette konfirmerer ikke *Tetrapteryx*-teorien. Dertil skal man have endnu en fire-vinget form, enten hos en primitiv fugl eller måske hellere hos endnu fjernere slægtninge til gruppen Paraves.

For endeligt at løse gåden om, hvordan flyvningen opstod, må der findes flere og gerne ældre fossiler. Og måske skal de findes i de berømte Liaoning-aflejringer i det nordøstlige Kina. Særligt interessant kunne det være at finde et bedre eksemplar af den kun fragmentarisk kendte *Protarchaeopteryx* med alle fjer på. *Protarchaeopteryx* kunne repræsentere et stadium, der er lidt fjernere beslægtet med fuglene end *Microraptor gui* er. Det skal nok ske en dag, ligesom der for nyligt blev fundet en lille (1,5 meter lang) og primitiv *Tyrannosaurus*-slægtning, der viste sig at have 'hårlignende' fjer.