

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

Peter har løst gåden om kaskelothvalen

Hvad bruger kaskelothvalen sin enorme næse til, og hvor meget energi har en hval egentlig brug for? Hvalforsker Peter Teglberg har viet sit liv til at forstå havets giganter.

DNA i Arktis' havbund sladrer om klimahistorie

Forskere bruger DNA fra en bestemt alge til at afgøre, om der har været havis i Arktis om sommeren i fortiden.

Nogle uendeligheder er større end andre

Uendelighed er en ide, som historisk har voldt matematikerne kvaler, men som de ikke kan undvære.

Nr 04 · 2026

PRIS 50 KR



■ OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

ANSVARSHAVENDE

Poul Nissen, prodekan,
Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet.

REDAKTION

Carsten Rabæk Kjaer (CRK), redaktør
Jørgen Dahlgaard (JD), redaktør
Rasmus Kern-Jespersen (RKJ), kommunikationschef
Henriette Stevnhøj (HS), journalist
Jeppe Kyhne Knudsen (JKK), journalist

Eftertryk kun efter aftale. Citat kun med tydelig kildeangivelse. Synspunkter, der fremføres i bladet, kan ikke generelt tages som udtryk for redaktionens holdning.

ABONNEMENTSSERVICE

Har du fået ny adresse eller ønsker du at bestille et abonnement på bladet?
Kontakt os på telefon: 3036 0662
E-mail: abo@aktuelnaturvidenskab.dk
Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

UDGIVER

Aarhus Universitet, Faculty of Natural Sciences og
Faculty of Technical Sciences.

KONTAKT

Aktuel Naturvidenskab
Ny Munkegade 120, Bygning 1520
DK-8000 Aarhus C
Tlf.: 3036 0660 / 8715 2094
E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

LAYOUT

Jørgen Dahlgaard

TRYK

Jørn Thomsen Elbo

ISSN

1399-2309 (papirversionen),
1602-3544 (web)

OPLAG

11.000

FORSIDEFOTO

Peter Teglberg Madsen,
professor ved Aarhus Universitet.
Foto: Liv Rohde, AU Foto



AARHUS
UNIVERSITET

SPONSORABONNENT

GRUNDFOS 





04

Kort nyt

- En tand med et twist: om narhvalens stødtand.

- Sådan æder vanddråber sig gennem sten.

- Skibsvrag fra 1. og 2. verdenskrig forurener dansk del af Nordsøen.

- Studerende analyserer sten fra rummet.



06

Peter Teglbjerg opklarede et af de største mysterier om kaskelothvalen. Egentlig ville han være biolog i en kommune, men endte som en af verdens førende hvalforskere.

10

Når størrelsen virkelig betyder noget
Hvaler er store dyr. Men det faktum dækker over en enorm variation i kropsstørrelse. Derfor er hvalernes fysiologiske løsninger på basale behov som at holde varmen og dykke dybt og langt særligt spændende at udforske, mener hvalforsker Peter Teglbjerg.

16

Kapløbet om kvantecomputeren
Der foregår i øjeblikket et globalt kapløb om at udvikle en kvantecomputer, der kan bruges til noget interessant. I det kapløb står forskerne både overfor spændende faglige udfordringer og ben-spænd på grund af en anstrengt geopolitisk situation.



22

Kaffens biologi
Kaffe er en af verdens mest populære drikke. Men dyrkning af den dominerende kaffesort "Arabica" trues af klimaforandringer. Kom med på en rejse gennem kaffens biologi, fra det etiopiske højland til koppen, og mød de vilde arter, der kan sikre fremtidens kaffeforsyning.

28

Fremtidens fødevarer vokser i havet
Presset på landjord og ferskvand stiger. Derfor giver det god mening, hvis flere af vores fødevarer i fremtiden kan baseres på tang fra havet. Tang kan produceres med lav klimabelastning og endda bidrage til et bedre havmiljø. Og så er det en både næringsrig og smagfuld råvare.

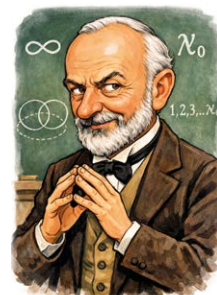


32

DNA i havbunden under Arktis er økosystemernes historiske hukommelse
Om få årtier vil Arktis efter alt at dømme opleve somre helt uden havis for første gang i menneskehedens historie. For at forstå, hvilke konsekvenser det vil få, graver danske forskere ned i havbundens mudder, hvor flere tusind års klimahistorie ligger gemt i gammelt DNA.

38

Candela – lyset, der er lysets målestok
Candela, som er SI-enheden for lysintensitet, er en underlig basisenhed. Den kan nemlig udtrykkes ved hjælp af andre SI-enheder, den har en meget snæver og kryptisk definition, og så er det den eneste SI-enhed, som tager udgangspunkt i menneskets sanser.



44

En matematisk idé, vi ikke kan leve uden
Uendelighed er et begreb, som har voldt matematikerne kvaler gennem tiden. Men med udviklingen af mængdelæren fik de styr på problemerne, hvilket blandt andet udmøntede sig i den erkendelse, at nogle uendeligheder er større end andre.

49

BØGER

51

Er mænd virkelig fra Mars?

KORT NYT ■

EN TAND MED ET TWIST

Narhvalens ikoniske stødtand har forbløffet mennesker i århundreder – engang solgt som enhjørningehorn, senere som et naturvidenskabeligt mysterium. Et internationalt forskerhold ledet fra Aarhus Universitet har netop knækket koden til, hvordan tanden får sin karakteristiske snoning – og svaret er mere komplekst end ventet.

Stødtanden er i virkeligheden narhvalens venstre hjørnetand, der vokser gennem læben og kan blive over to meter lang. Den har ingen emalje, men består af dentin på indersiden og cement på ydersiden – altså ikke den grå byggevariant, men en biologisk, kalkholdig substans, der danner tandens hårde ydre skjold.

Indtil nu troede man, at den indeholdt én venstredrejende spiral. Men ved hjælp af avanceret 3D-røntgenteknik – såkaldt tensortomografi – på tre kæmpe synkrotroner i Sverige, Schweiz og Frankrig har forskerne kortlagt tandens indre struktur på nanoskala.

Og det viser sig, at tanden gemmer på to modsatrettede spiraler: I det ydre cement snor mineralcollagenfibrillerne sig til venstre, mens de i den indre dentin drejer mod højre. Fibrillerne er mikroskopiske byggesten bestående af proteinet kollagen, som er beklædt med små mineralkrystaller.

De to strukturer mødes i grænsefladen mellem dentin og cement og skaber den dobbelte spiral. Arkitekturen gør tanden langt stærkere og mere modstandsdygtig over for bøjning og vridning end en enkelt spiral.



Foto: Mads Peter Heide-Jørgensen, Grønlands Naturinstitut.

De årlige vækstlag i tanden viser – som årringe i træer – at den dobbelte spiral bevarer gennem hele narhvalens liv, der kan strække sig over cirka 80 år. Det tyder på, at mønstret er genetisk programmeret og ikke blot et tilfældigt produkt af omgivelserne.

Forskerne håber, at forståelsen af denne biologiske *high-tech*-konstruktion på sigt kan inspirere til udviklingen af nye kompositmaterialer inden for medicin og ingeniørvidenskab. Desuden kan tandens årlige lag fungere som en tidskapsel, der dokumenterer miljøforandringer i Nordatlanten op til 80 år tilbage i tiden.

Peter F. Gammelby

SÅDAN ÆDER VANDDRÅBER SIG GENNEM STEN

Det kan være svært at forstå, hvordan noget så skrøbeligt som vanddråber er i stand til at nedbryde selv hård klippe. Men det kan de – bare der er tid nok til rådighed. Ny forskning af Ian Kim ved Binghamton University i New York og hans kolleger dykker ned i detaljerne af, hvordan denne proces foregår. Forskerne placerede en følsom sensor under tynde glasskiver, som kunne måle, hvordan glasoverfladen blev deformeret, når vanddråber faldt ned på glasset. Samtidig filmede de også dråberne med højhastighedskamera.

Resultaterne viste, at hver eneste dråbe nærmest virker som en lille hammer, som

gentagne gange skader overfladen i de første få millisekunder efter kontakt. I de første to millisekunder udsættes overfladen for en så kraftig påvirkning, at der kan dannes små sprækker i materialet. Efterfølgende – op til 20 millisekunder efter sammenstødet – vibrerer vandet og overfladen i takt med en fælles frekvens (100-500 Hz). Det er en frekvens, der ligger tæt på den, som mange sten naturligt vibrerer lettest ved. Ifølge forskerne kan netop disse synkrone vibrationer få mikrosprækker til at udvide sig og dermed accelerere erosionen markant.

CRK, Kilde: *Nature* 656, 276 (2026)/
Small (2026): e74628

SKIBSVRAG FRA 1. OG 2. VERDENSKRIG FORURENER DANSK DEL AF NORDSØEN

I april 1917 sejlede den tyske ubåd UC-30 rundt under bølgerne ud for Rømø. Egentlig havde den været på mission i Irland, men fik motorproblemer, vendte om og var næsten hjemme i Tyskland. Med ombord havde ubåden 18 miner og seks torpedoer, men den nåede aldrig sikkert i havn. Den 19. april stødte den ind i en engelsk mine og sank. 27 mand omkom og vragefs placering var ukendt, indtil det i 2016, knap 100 år senere, blev fundet af den danske dykker Gert Normann Andersen.

Ubåden er et af de vrage, som professor på Institut for Geoscience på Aarhus Universitet, Katrine Juul Andresen, i et stort forskningsprojekt, NorthSeaWrecks, har været med til at undersøge.

»Vi fandt rester af TNT i både dyreliv, havbund og vandsøjlen. Der sker derfor en forurening. Spørgsmålet er, hvor stor effekten er, og hvor langt væk fra vragef forureningen påvirker havmiljøet. Det er nok en relativ lokal forureningskilde, men den vil blive værre i takt med, at vragef fortsat ruste og blotlægger mere af det eksplosive materiale,« siger hun.



En dykker anbringer blåmuslinger og instrumenter på ubåden, hvor der er sprængstof (TNT). Foto: Søværnets Dykkertjeneste.

Den tyske ubåd er et blandt mange historiske vrage, som ligger i danske farvande. Professor lavede i 2024 en rapport for Miljøstyrelsen, hvor hun kortlagde og vurderede miljørisikoen ved sådanne vrage.

»I rapporten nåede jeg frem til, at der ligger 10.127 vrage i danske farvande. Omkring 15 procent af dem stammer fra årene omkring og under de to verdenskrige [årene 1910-1920 og 1940-1945, red.] Det er ret mange,« siger hun.

»Nogle af vragefne er helt eller delvist begravet i sandet på havbunden. Når de er dækket af sand, er der ikke så stor risiko for, at de forurener havet omkring sig. Det handler altså om at få kortlagt, hvor miljøtruslen er størst.«

JKK, Kilde: *Marine Pollution Bulletin*, Volume 229, 2026, 119738

STUDERENDE ANALYSERER STEN FRA RUMMET

For mere end 10 år siden hamrede en meteorit gennem taget i et sommerhusaneks ved Dueodde på Bornholm. Husets ejere undrede sig over det lille cirkelformede hul i taget og fandt en sten på gulvet. Heldigvis fornemmede de, at stenen var noget særligt og sendte den til Statens Naturhistoriske Museum i København. Her blev det konstateret, at der var tale om en såkaldt kondrit – en almindelig type meteorit, som blandt andet består af mineralerne olivin, ortopyroksen og plagioklas. Det er den samme type meteorit, som i 2016 eksploderede over Ejby på Sjælland, og som man siden har fundet 11 fragmenter af.

Nu har tre studerende fra Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet, Mia Rose Evelyn Boothroyd, Anna W. Jensen og Charlotte Rackham Håkansson taget et langt grundigere kig på den 75 gram tunge sten, som er cirka 4,5 milliarder år gammel og stammer fra et tidligt himmellegeme i vores solsystem. Sammen har de lavet den hidtil mest detaljerede analyse af Dueodde-meteoritten, som de nu har publiceret i det



Charlotte Rackham Håkansson med Dueodde-meteoritten. Foto: James Scott.

videnskabelige tidsskrift *Bulletin of the Geological Society of Denmark*. En af de tre er Charlotte Rackham Håkansson, som bogstaveligt talt har fordybet sig i meteorittens indre.

»Det har været sjovt og interessant at arbejde med et materiale, som har så konkret en historie. Vi kender til dens vej gennem rummet og til findestedet i huset på Bornholm, og det har faktisk gjort den mere nærværende,« lyder det fra Charlotte, som også fremhæver det forskningsmæssige aspekt.

»Som forsker kan du ikke bare kigge på stenen og konkludere, hvad den er. Man er nødt til at undersøge den fra flere forskellige vinkler og samle resultaterne for at kunne sige noget sikkert om dens oprindelse og egenskaber.«

De studerendes analyse ændrer ikke på den eksisterende viden om meteorittens sammensætning. Til gengæld giver den en mere detaljeret dokumentation af meteorittens mineraler og teksturer og bekræfter dermed tidligere undersøgelser. For Charlotte har det været god læring at følge hele processen.

»Det er fedt at vide, at det arbejde, vi har lavet, kan bidrage med viden om meteoritten og samtidig blive en del af den videnskabelige litteratur,« siger hun.

HS, Kilde: *Bulletin*, Vol. 75 · 2026



Peter opklarede et af de største mysterier om kaskelothvalen

Egentlig ville han være biolog i en kommune, men endte som en af verdens førende hvalforskere.

■ Af Jeppe Kyhne Knudsen, Aktuell Naturvidenskab





■ Kaskelothval. Illustration: Shutterstock

I december 1997 strandede 13 store kaskelothvaler på stranden ved Rømmø. En af de største massestrandinger af kaskelothvaler i danmarkshistorien. Professor Peter Teglberg Madsen var på det tidspunkt biologistuderende på Aarhus Universitet, men fik muligheden for at tage med sin vejleder Bertel Møhl ned og se hvalerne.

Da han stod der på den kolde strand og betragtede de store dyr, slog en tanke ned i ham: Hvorfor er deres næser så enorme? Han spurgte derfor sin vejleder.

»Vi ved det ikke med sikkerhed, svarede han. Og lige der tændtes der et eller andet i mig. Jeg måtte finde ud af, hvad kaskelothvaler bruger deres kæmpestore næse til,« fortæller Peter Teglberg Madsen.

Brugte tre år på at fejle

Han var heldig at få en ph.d. finansieret af universitetet selv – og her kunne han forfølge netop dette spørgsmål. Noget der havde været næsten umuligt at få eksterne fonde til at finansiere, forklarer han.

Det var dog lettere sagt end gjort at undersøge, hvad kaskelothvalen bruger sin næse til. En sådan undersøgelse krævede, at han kunne montere en lydoptager på hvalen, som kunne vise, hvad hvalerne foretager sig, når de dykker 1.000 meter ned under havoverfladen. Og det var nær ikke lykkedes ham.

»Jeg brugte tre ud af de fire år, som min ph.d.-stilling varede, på at fejle i forsøget på at sætte en datalogger fast på vilde kaskelothvaler. Mine forsøg ville simpelthen ikke lykkes – og jeg var tæt på at give op.«

Under et ph.d.-kursus på Hawaii skete der heldigvis noget, som gav hans projekt vind i sejlene. En nyfødt kaskelothval skyllede ved et tilfælde op på stranden. Den vender vi tilbage til.

Jacques Cousteau i Vestjylland

Peter Teglberg Madsens kontor er fyldt med bøger. Nogle står fint og nydeligt, mens de fleste ligger hulter til bulter på hylderne og

bærer præg af, at de bliver slået op i, læst i og lånt ud. På væggene hænger bader fra hvaler, og på en kommode står kranier fra forskellige store pattedyr.

Når man træder ind på kontoret, er man ikke i tvivl om, at en professor i biologi holder til her. Men faktisk havde han aldrig forestillet sig, at han skulle ende her. Planen var egentlig at arbejde som biolog i en kommune.

»Jeg synes, at biologerne i landets kommuner gør et enormt vigtigt stykke arbejde. I lang tid tænkte jeg, at det var det, jeg skulle,« siger han.

At det var biologien han skulle forfølge, var han dog aldrig i tvivl om.

»I vores hus i den lille by i Vestjylland, hvor jeg voksede op, sad jeg klinet til skærmen, hver gang Jacques Cousteau kom på. Ligesom mange andre drømte jeg om at sejle ud på verdenshavene og opleve livet under overfladen. Mine forældre, som begge var lærere, var desuden meget interesserede i naturhistorie, så jeg fik det ligesom ind med modermælken.«

Vokset op i modvind

I den lille by Timring mellem Herning og vestkysten, hvor Peter Teglberg Madsen voksede op, var mange af indbyggerne en del af Indre Mission. De havde et markant anderledes syn på verden – især på naturvidenskaben – og det gav nogle interessante diskussioner i skolen, fortæller han.

»Jeg vænnede mig til at være i modvind i diskussionerne, fordi jeg insisterede på, at der måtte være et videnskabeligt svar på de fleste spørgsmål. Ofte stod jeg noget alene med det argument.«

Hans forældre var ikke en del af de religiøse miljø i byen. De skilte sig derfor temmelig meget ud. Men for Peter var det en god ting.

»Mine forældre var nok blandt de få hedninge i byen, men det har egentlig bare styrket mig,

føler jeg. Det har forberedt mig på somme tider at være i modvind i den offentlige debat som forsker – det er ok, så længe man har sin faglighed og argumenter i orden,« siger han.

Og netop det med at være i modvind i medierne har han lige været igennem.

»Jeg udtalte mig kritisk om de tyskere, der forsøgte at redde den strandede pukkelhval i Tyskland i foråret. Når hvaler strander, er det for det meste, fordi de er for syge til at kunne klare sig. Det var derfor spild af kræfter og dyremishandling af den udmagrede og syge hval, at de trak den rundt i tre dage i en pram for så at dumpe den til drukning i Nordsøen.«

Det fik jeg godt nok meget kritik for at sige. Især i de tyske medier. Men jeg mener, at en vigtig del af at være forsker er at bidrage med nuancer og viden til den offentlige debat.«

En hval i en swimming pool

Tilbage på Hawaii, under Peter Teglberg Madsens ph.d.-tid, blev den nyfødte kaskelothval af dyrlæger flyttet op i en swimming pool i et forsøg på at redde den. Det gav ham muligheden for at lave nogle målinger, som kunne bruges i hans forskning.

»Fordi den lå i swimmingpoolen, kunne vi sætte undervandsmikrofoner op og måle, hvad der skete i dens store næse. Her fik vi vist, at næsen bliver brugt til at frembringe klik-lyde til både kommunikation og ekkolokalisering,« fortæller han.

Peter og hans vejleder havde gennem en stor del af ph.d.'en heftigt diskuteret, hvordan han kunne sætte måleudstyr på kaskelothvalerne for at få de målingerne, han havde brug for. Vejlederen ville, at han skulle bruge harpuner til at sætte det fast på hvalen, men det ville Peter ikke.

»Harpuner ville gøre det nemmere at få sat udstyret på hvalen, fordi man ikke skal lige så tæt på. Men det gør ondt på hvalen, og så opfører den sig jo anderledes end normalt, når den er i smerter. Jeg ville derfor sætte måleudstyret på med sugekop.«



Det var dog lettere sagt end gjort. Peter udviklede nogle store sugekopper, som hans vejleder på ingen måde troede ville virke. Og så forsøgte han sig ellers med at få sat dem på nogle kaskelothvaler.

»Jeg prøvede igen og igen, men det lykkedes bare ikke. Jeg var i Nordnorge en hel sommer for at prøve, men uden held. Én ting var at lave målinger af den nyfødte kalv i poolen, men jeg havde brug for at få data fra fuldvoksne hvaler i deres naturlige miljø.«

Lånte penge af forældrene

Uenigheden med vejlederen fortsatte, og til sidst ville han ikke finansiere flere mislykkede forsøg med at sætte sugekopper på hvaler. Da Peter kom og spurgte, om han måtte bruge forskningsmidler på at rejse til Papua Ny Guinea, hvor han havde fået lov at låne den berømte hvalforsker Roger Paynes båd gratis i en måned, fik han et nej. I stedet spurgte Peter sine forældre, om han måtte låne 15.000 kroner til en flybillet derned. Det måtte han godt, og kort efter var han på vej.

»I Bismarck-havet ud for Ny Guinea lykkedes det endelig. En stor hunkaskelot lod os sejle helt tæt på og montere sugekoppen. Og så fik jeg de målinger, jeg havde brug for.

Det var godt for selvtilliden at skrive til min vejleder, da vi kom i land, at det faktisk havde virket med sugekopperne.«

Med målingerne viste Peter, hans kollega Magnus Wahlberg og vejlederen Bertel Møhl, at kaskelothvalen bruger sin gigantiske næse til at frembringe de højeste biologiske lyde i verden for at ekkolokalisere blæksprutter i dybhavet.

»Kaskelothvalen kan finde blæksprutter, der er op til en kilometer væk. Dens lyde er et meget effektivt jagtredskab. Det kunne vi for første gang dokumentere.«

En videnskabelig idolplakat

Kaskelothvalen blev den første i en lang række af hvaler, som Peter Teglberg Madsen og

hans team har monteret måleudstyr på. I dag har de tagget omkring 1200 hvaler og har en kæmpe mængde data, som de hele tiden analyserer på, for at blive klogere på havets kæmper.

Han finder en af sugekopperne fra Ny Guinea frem og lader falde på gulvet med et svup. Sugekoppen hænger fast, og han har svært ved at vriste den løs fra det gråhvide linoleumsgulv igen.

Bag ham hænger et sort-hvidt billede af en ældre mand med skæg, blazer og butterfly.

»Det er mit videnskabelige idol,« siger han og sætter sugekoppen på plads på en reol. »August Krogh. Han er en kæmpe inspirationskilde. Ikke nok med at han vandt nobelprisen og var grundlægger af zoofysiologien, så han gik til videnskaben på en helt særlig måde.

Han målte aldrig noget uden at være helt klar over, hvad han forsøgte at få svar på. Han var eksponent for, at man aldrig skulle lade ens instrumenter drive ens målinger, men omvendt. Den tilgang forsøger jeg også at have i den videnskab, vi laver i mit lab i dag.«

Ifølge Peter foregår meget videnskab i dag ved, at man laver en masse målinger, og så forsøger man bagefter at finde ud af, hvad de kan forklare. Men det er en bagvendt og problematisk måde at lave videnskab på, mener han.

»Vi bygger meget udstyr selv med vores dygtige værkstedsfolk, fordi vi først finder de spørgsmål, vi gerne vil have svar på og derefter designer udstyr, som kan give os svaret. Den tilgang prøver jeg at banke ind i mine studerende. Jeg tror, at det er altafgørende for de resultater, vi har skabt,« siger han.

Fra hvaler til flagermus

Peter Teglberg Madsen er i dag professor og har mere end 20 forskere ansat i sin gruppe. Det kræver, at han er til stede og kan rådgive og hjælpe. Derfor kommer han ikke på så mange togter på verdenshavene længere.

»I en årrække var jeg på havet mindst halvdel af året. Jeg rejste rundt i hele verden. Det var fantastisk. Men da jeg fik børn, duede det ikke længere. Jeg fik dem, fordi jeg ville være sammen med dem og min søde kone.

Desuden kan man ikke være en ordentlig leder og vejleder, hvis man er væk hele tiden. Jeg er nok på havet et par uger om året nu.«

Det er heller ikke kun hvaler, han beskæftiger sig med længere. En del af hans forskningsgruppe forsøger at blive klogere på flagermus og deres måde at bruge ekkolokalisering på.

»Sammen med min kollega Laura Stidsholt undersøger vi lige nu nogle flagermus i Syd-europa, som flyver i 200 meters højde. De fanger små trækfugle, og vi vil gerne vide præcist, hvordan de gør.

Derfor er en af mine ph.d.-studerende Astrid Særmark Uebel ved at designe noget måleudstyr, vi sender op med en vejrballoon. Forhåbentlig kan vi på den måde blive klogere på om der også findes flagermus, der kalder meget højt med ekkolokalisering for at finde føde.« ■

VIDERE LÆSNING

Artikel om arbejdet med kaskelothvaler:
Peter Teglberg Madsen: Kaskelothvalens store næse, Aktuel Naturvidenskab nr. 3-2002.

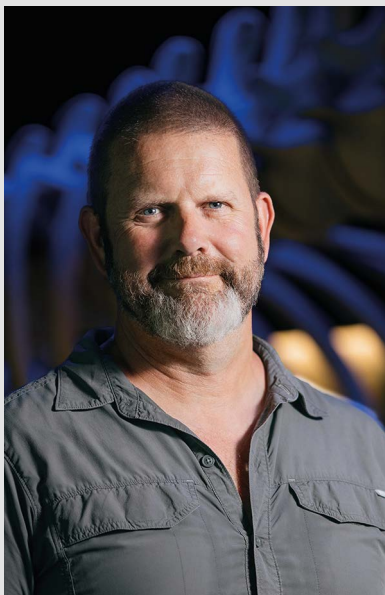
Peter Teglberg Madsen: Gåden om verdens største næse. I 25 Søforklaringer, Aarhus Universitetsforlag 2014.

.....

Når størrelsen virkelig betyder noget

Hvaler er store dyr. Men det faktum dækker over en enorm variation i kropsstørrelse. Derfor er hvalernes fysiologiske løsninger på basale behov som at holde varmen og dykke dybt og langt særligt spændende at udforske, mener hvalforsker Peter Teglberg.

■ Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab



PETER TEGLBERG MADSEN

Professor i sansefysiologi ved Institut for Biologi, Aarhus Universitet. Han er en af verdens førende forskere i hvalers fødesøgning og energibehov.

peter.madsen@bio.au.dk

Peter Teglberg Madsen holder foredrag om hvaler i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab den 6. oktober 2026. Læs mere på www.ofn.au.dk

Peter Teglberg Madsen er vild med hvaler. Fascinationen af disse de største dyr, der nogensinde har levet på Jorden, deler han med mange andre mennesker. Men Peter Teglberg har ikke ladet sig nøje med at være fascineret – han har omsat sin dybe interesse til handling igennem mange års forskning i hvalers fysiologi på Aarhus Universitet.

Det er forskning, som har bragt ham verden rundt i jagten på svar på spørgsmål som, hvad kaskelothvalen bruger sin kæmpestore næse til, hvordan pukkelhvaler kan tage 30 tons vand ind i munden uden at rykke kæben af led, eller hvordan marsvin kommunikerer med hinanden. Forskning, der er foregået i et tæt samspil med udvikling af ny teknologi, som kan måle direkte på de store dyr.

Når Peter Teglberg skal beskrive sin forskningsmæssige fascination af hvaler, koger han det ned til et meget grundlæggende fysiologisk spørgsmål. Nemlig, hvordan i alverden de varmblodede hvaler er i stand til at klare de ekstreme betingelser, de udsættes for i havet.

Disse spørgsmål relaterer til, at hvalerne fysiologisk set har to overordnede udfordringer:

»Den ene er, at kunne holde varmen. Hvordan kan hvaler svømme rundt i vand med temperaturer omkring frysepunktet, der ville slå mennesker ihjel på 15 minutter,« spørger han.

»Den anden udfordring er, at hvalerne skal have adgang til ressourcer, som dels er ilt ved havoverfladen, og dels føde i dybden.

For nogle hvaler – heriblandt kaskelotten – er der altså mere end en kilometers afstand mellem de to. Det betyder, at hvaler skal være rigtig gode til at komme af med CO₂ og optage ilt – og så skal de være gode til at spare på ilt, når de dykker ned for at finde mad,« siger Peter Teglberg.

Mus-elefant-kurven

Ved første øjekast kan disse udfordringer virke monstrøse. Men faktisk handler løsningen på dem et langt stykke ad vejen om noget meget simpelt; nemlig størrelse.

»Fælles for hvaler er, at de praktisk talt alle sammen er store – selv de mindste af hvalerne, for eksempel et marsvin, vejer lige så meget som et menneske,« siger Peter.

I praksis spænder hvalerne dog over en enorm størrelsesvariation – fra det mindste marsvin på blot 50 kilo til den enorme blåhval, der kan veje op til 150 ton, er der en forskel på næsten 3.000 gange i kropsvægt. Og netop den størrelsesvariation gør hvalerne til særligt interessante studieobjekter, mener Peter Teglberg.

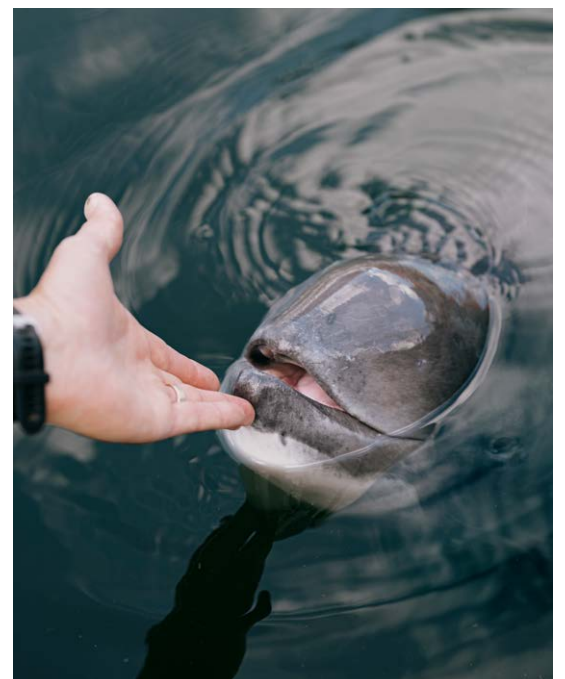
Men hvad har de førnævnte udfordringer med størrelsen at gøre?

»Når hvaler er meget store, har de ingen problemer med at holde varmen – tværtimod er problemet snarere at komme af med varmen,« fortæller Peter Teglberg.

Dette skyldes, at varmen stammer fra stofskifteprocesser inde i hvalens celler, mens varmen forsvinder fra dyrets overflade. Og jo større hvalen er, jo mindre er overfladearealet i forhold til vægten: For et marsvin



For hvalforskere som Peter Teglberg gælder det om at rykke ud, når chancen byder sig. Her dissekerer han en kaskelothval strandet på Henne Strand i 2014. Foto: Jørgen Hilmer Hansen



På Fjord&Bælt i Kerteminde kan forskerne helt unikt forske i de små hvalers biologi. Her har Peter Teglberg sammen med dyretræner Nele Bombe sat en datalogger på et marsvin. Fotos: Liv Rohde, AU Foto

er dette forholdstal cirka 20, mens det for en stor bardehvaler kun er cirka 1. Det betyder, at varmeproduktionen fra en stor hval på 30 tons ikke har problemer med at følge med afkølingen fra overfladen – selv i to grader koldt vand.

Faktisk kan stofskifteprocesser producere så meget varme, at hvis stofskiftet i den store pukkelhval foregik med samme rate per kg som i det lille marsvin, ville pukkelhvalen simpelthen "koge over". Men det gør den ikke, forklarer Peter Teglberg:

»Det skyldes, at stofskiftet ikke stiger én til én med kropsvægten, men med massen af dyret i potensen cirka 0,75. Og det er en biologisk sammenhæng, vi kan se på tværs af alle dyr – fra bittesmå mus til hvaler.«

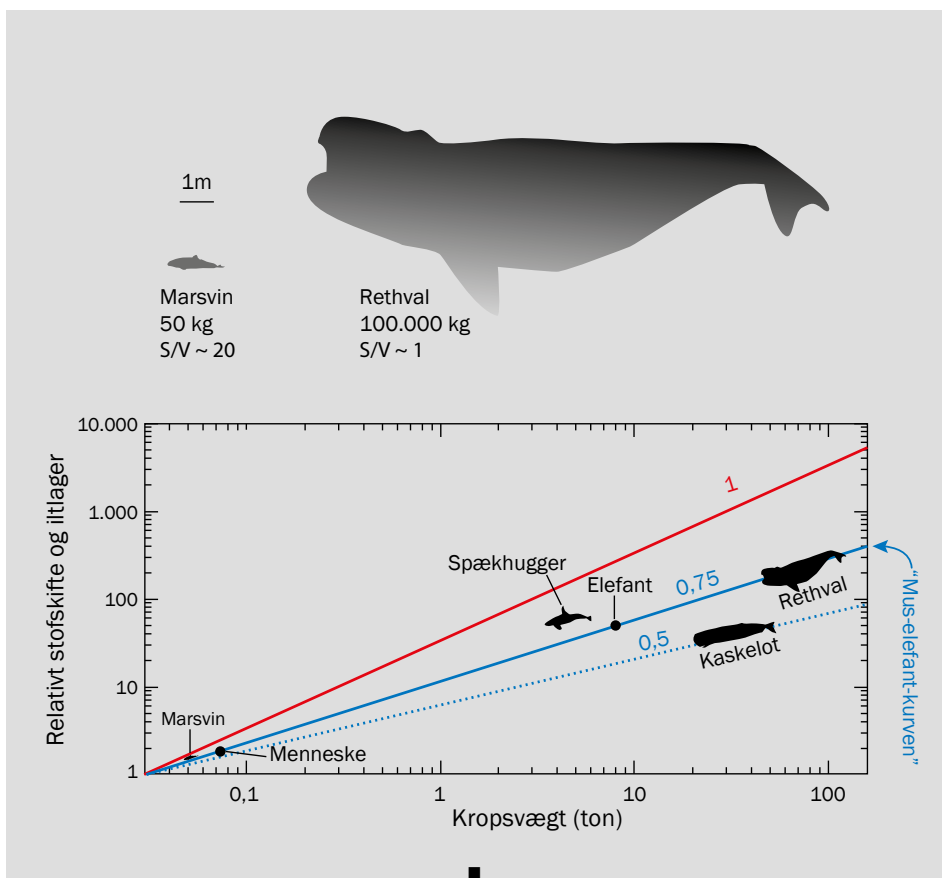
Stor størrelse giver stor energieffektivitet

Allerede i 1830'erne blev man klar over, at stofskiftet ikke kunne stige isometrisk – dvs. en-til-en – med massen af et dyr. Men det var den schweiziske biolog Max Kleiber, der i 1932 satte tallet 0,75 på sammenhængen, som populært kaldes "Mus-elefant-kurven" og mere formelt Kleibers lov eller bare $\frac{3}{4}$ -loven.

På fagsproget kaldes det allometrisk vækst, når et organ eller en proces ikke skalerer én til én med kropsstørrelsen. I forhold til organismernes energibehov er konsekvensen af stofskiftets skalering, at godt nok bliver det samlede set dyrere i energi, jo større, man er – men det bliver relativt billigere per kilo kropsvægt.

En stor hval behøver derfor ikke bekymre sig om at holde varmen – det går helt af sig selv. Anderledes er det for et lille marsvin i Grønland, der føder en unge på måske kun syv kilo i to grader koldt vand. Der er ingen vej uden om, at det energimæssigt er dyrt per kilo kropsvægt for et ensvarmt pattedyr på den størrelse at skulle leve under de forhold.

»Derfor har stofskiftet i et marsvin også fart på«, fortæller Peter Teglberg. »Faktisk ligger alle de små tandhvaler pænt over gennemsnittet på mus-elefant-kurven og har et stofskifte der er 2 gange større per kg end et menneske.«



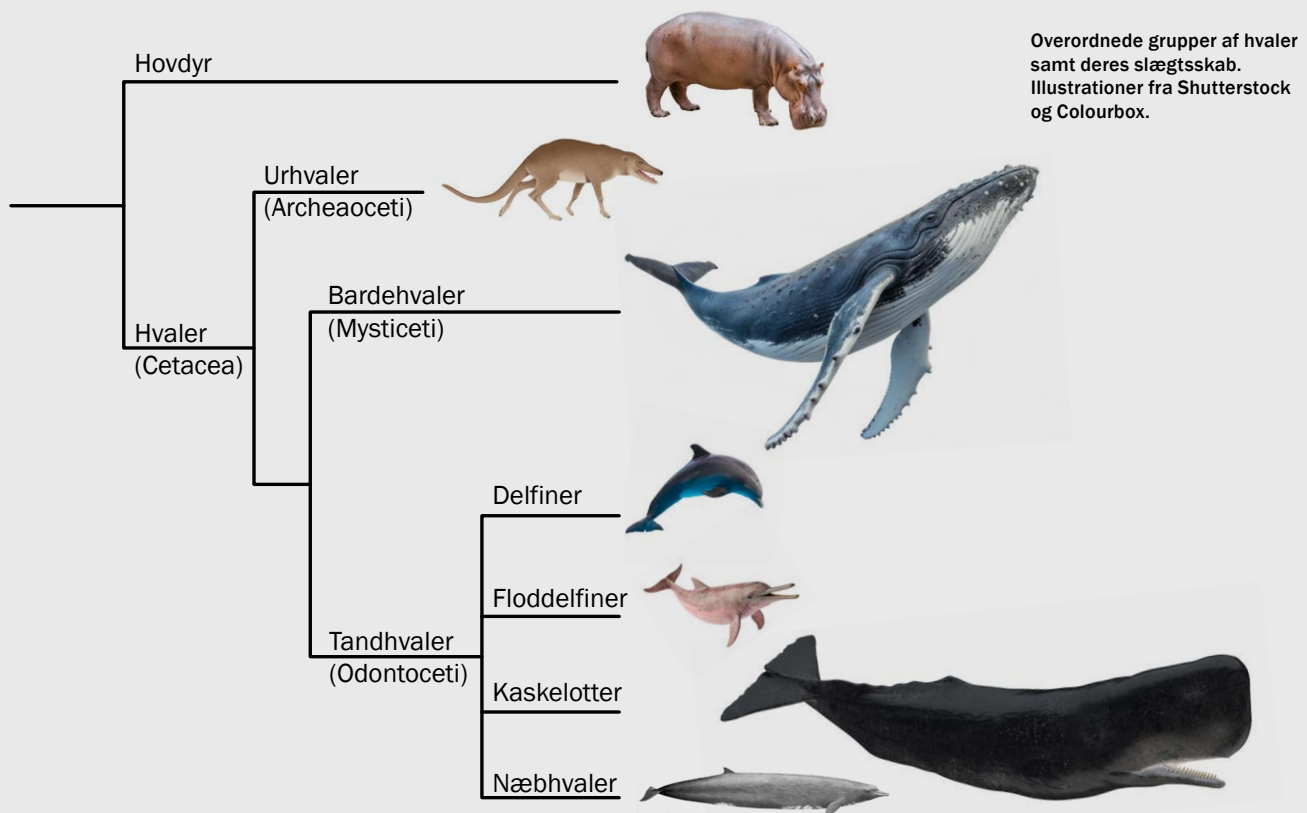
MUS-ELEFANT-KURVE

Figuren viser, hvor forskellige hvaler placerer sig på en "mus-elefant-kurve", hvor stofskiftet vokser med massen opløftet til potensen 0,75. Læg mærke til, at skalaen på både x-akse og y-akse er logaritmisk. Målinger på tandhvaler som marsvin og spækhuggere i fangenskab har vist, at deres stofskifte faktisk ligger over "mus-elefant-kurven". Da man i sin tid fandt ud af det, tænkte man, at det gav god mening, fordi de levede i koldt vand, og at alle hvaler af denne grund nok ville følge en kurve, som lå højere end for landlevende pattedyr. Men hvis man blot forlænger en sådan højereliggende kurve (hvor potensen for eksempel er 0,87

i stedet for 0,75), vil de største hvaler i så fald have et helt enormt – og urealistisk – stort fødebehov. Peter Teglberg og kolleger har da også siden kunnet vise, at de store bardehvaler faktisk ligger pænt på mus-elefant-kurven. Og de har data, der tyder på, at de store tandhvaler (som kaskelotten) ligger endnu lavere, nærmere på en kurve, hvor stofskiftet skalerer med potensen 0,5.

Den røde kurve viser til sammenligning, hvordan mængden af spæk og oxygen skalerer 1:1 med kropsvægten.

Tilpasset efter Goldbogen et al 2023.



HVALER

Hvaler tæller mere end 80 forskellige arter spredt fra isdækket polarhav til varme tropen. Langt de fleste arter lever i havet, men enkelte har slået sig ned i floder og lever hele deres liv i ferskvand.

Alle hvaler nedstammer fra en – meget mindre – stamform beslægtet med nutidens grise og flodheste, der for omkring 50 millioner år siden travede rundt på landjorden på fire ben. I løbet af de følgende cirka 10 millioner år gennemgik de tidlige hvaler en bemærkelsesværdig evolutionær transformation. Baglemmerne skrumpede ind til det rene ingenting til fordel for en hale, der stod for fremdriften. Forlemmerne blev omdannet til finner, der fungerer som rorflader under svømningen. Samtidig forvandlede kranie og kæber sig markant, så dyrene kunne anvende deres sanser under vandet, trække vejret effektivt og fange føde under overfladen.

Hvaler tilhører pattedyrene, og i den videnskabelige systematik klassificeres hvaler som en såkaldt orden med det latinske navn Cetacea. Hvalerne inddeles overordnet i to hovedgrupper: Tandhvaler (kaldet Odontoceti på latin) og bardehvaler (Mysticeti).

Tandhvalerne finder deres føde ved hjælp af ekkolokalisering. Nogle arter har stadig tænder i kæberne, mens andre kun har få eller slet ingen. Fælles for dem alle er dog, at deres forfædre engang havde et fuldt sæt tænder.

Bardehvalernes anlæg til tænder opløses allerede i fostertilstanden, og i stedet vokser der fra overkæbernes gummer lange, bøjelige plader af keratin kaldet barder. Barderne bruges til at filtrere krebsdyr og plankton fra vandet, når hvalen med åben mund svømmer gennem vandmasserne.

Hvalerne har historisk set være jaget – nogle arter til randen af udryddelse – for deres spæk, barder, kød eller spermacetolie. Selvom den kommercielle hvaljagt er kraftigt reduceret, trues hvaler stadig af menneskelige aktiviteter. Både store og små hvaler kan blive ramt af skibe, fanget i net eller blive viklet ind i fiskeliner. Heldigvis er der også gode nyheder: Arter som pukkelhvalen og finhvalen er på vej tilbage efter at være blevet næsten udslettet af den industrielle hvalfangst, der nåede sit højdepunkt i det 20. århundrede.

Menneske

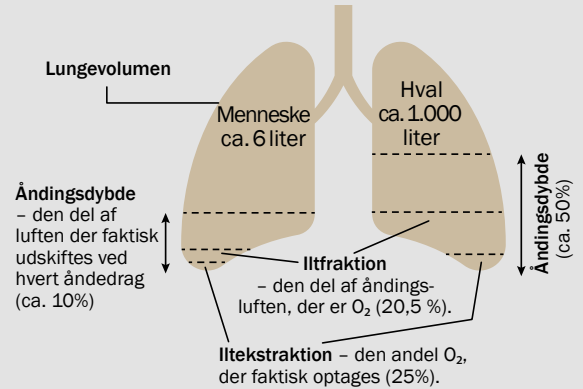


Vægt: 70 kg
 Åndingsdybde = 0,5 L
 Iltfraktion = 0,205
 Ilttekstraktion = 0,25
 Optaget volumen ilt:
 $0,5 \text{ L} \times 0,205 \times 0,25 = 0,026 \text{ L}$
 Da iltens energetiske værdi er 20 kJ/L O_2
 svarer hvert åndedrag til et stofskifte på:
 $0,026 \text{ L } \text{O}_2 \times 20 \text{ kJ/L } \text{O}_2 = 0,52 \text{ kJ}$
 Ved en åndedrætsfrekvens på 14/min
 er stofskiftet over 24 timer:
 $0,52 \text{ kJ} \times 14 \times 60 \times 24 = 10,5 \text{ MJ}$

Kaskelothval



Vægt: 50 tons
 Åndingsdybde = 500 L
 Iltfraktion = 0,205
 Ilttekstraktion = 0,25
 Optaget volumen ilt:
 $500 \text{ L} \times 0,205 \times 0,25 = 25,6 \text{ L}$
 Stofskifte per åndedrag:
 $25,6 \text{ L} \times 20 \text{ kJ/L } \text{O}_2 = 512,5 \text{ kJ}$
 Ved en åndedrætsfrekvens på 0,6/min
 er stofskiftet over 24 timer:
 $512,5 \text{ kJ} \times 0,6 \times 60 \times 24 = 443 \text{ MJ}$



HVORDAN MÅLER MAN STOFSKIFTET HOS EN HVAL?

Hvis man vil måle stofskiftet på et dyr – hvad enten det er en hval eller et menneske – har man egentlig blot brug for at vide, hvor ofte det trækker vejret. Man har også brug for at vide, hvor stort lungevolumenet er, men det kan man for en hval på snedig vis regne sig frem til ud fra, hvordan de accelerer til overfladen, fordi man kan udregne, hvor meget løft de får i kroppen fra luft, der ekspanderer. Når Peter Teglberg og kolleger sætter en datalogger på en hval, skal de altså som udgangspunkt kunne måle åndedrætsfrekvensen og hvalens acceleration. Det skyldes, at

de andre faktorer, der indgår i regnestykket (som fremgår på grafikken og de to eksempler) kender man på forhånd. En hval har forholdsvis mindre lunger end et menneske, men den udskifter en væsentlig større del af lungevolumenet ved hvert åndedræt. Og så trækker den vejret med en meget langsommere frekvens.

Hvis du går med et sportsur, der måler åndedrættet, kan du prøve at lave regnestykket på dig selv. Du kan nemt finde et estimat for dit lungevolumen på nettet.

Ekstremt sultepotentiale

Peter Teglberg fortæller, at de store hvaler måske er relativt endnu billigere per kilo end det, man kan læse ud af en kurve, hvor stofskiftet bare stiger med kropsvægten opløftet i potensen 0,75.

»Vi har endnu ikke data til med sikkerhed at kunne fastslå det, men vores forskning peger på, at vi måske nærmere snakker om, at stofskiftet for de store hvaler stiger med kropsvægten opløftet til en potens på 0,5,« siger Peter Teglberg.

Hvalernes energieffektivitet har nogle indlysende fordele – for eksempel, at de kan klare sig meget lang tid uden føde.

»De største af hvalerne – bardehvaler som blåhval og rethval – lever af dyreplankton, som blomstrer op i takt med de store opblomstringer af planteplankton, som dyreplanktonet selv lever af. Men det betyder, at der kun er to til fire måneder om året, hvor hvalerne har adgang til masser af føde, fulgt af op til ni måneder om året, hvor de stort set ikke æder,« siger Peter.

Potentialet for at faste er også noget, der følger af de basale skaleringsprincipper, når vi går fra lille til stor på mus-elefantkurven.

»Selvom det er vældig moderne at faste, er vi mennesker faktisk ikke gode til det sam-

menlignet med store dyr som hvaler. Vi kan måske holde os kørende nogle uger uden mad, hvis vi blot får vand. Og en spidsmus, der ikke får noget at spise i 6 timer, vil dø af sult. Til sammenligning er en pukkelhval sultepotentiale enormt. En gravid pukkelhval kan udvikle et foster, mens den svømmer fastende hele vejen fra Nordatlanten til Kap Verde-øerne, føde en kalv på et ton, som over de næste tre måneder vokser sig til en størrelse på 7-8 ton på morens mælk, og stadigt fastende svømme tilbage nordpå igen,« forklarer Peter Teglberg.

Moren betaler altså med egne spækreserver for sig eget stofskifte og for, at en kalv kan vokse til en størrelse på næsten 10 ton. Det

kan kun lade sig gøre, fordi hvalerne i kraft af deres størrelse er ekstremt billige i drift per kilo og kan lagre meget spæk på kroppen.

Skalering forklarer mange ting

For Peter Teglberg er det netop denne "skalering-fysiologi", som er med til at gøre hvaler enormt spændende. Altså at man kan forklare en masse af det, der foregår i et dyr, ud fra, hvordan stofskiftet skalerer med kropsvægten.

»Spækket, som er hvalernes energidepot, skalerer isometrisk – det vil sige, at hvis man forestiller sig det ekstremt, at en hval blev tusind gange større, vil den også have tusinde gange mere spæk. Men det massespecifikke stofskifte vil kun stige ca. 100 gange. Alt andet lige betyder det altså, at hvis man bliver tusind gange større, vil man kunne faste i ti gange så lang tid«, siger Peter Teglberg.

Han fortæller, at præcis den samme logik, forklarer, hvordan hvalerne kan klare de lange dyk. For mængden af ilt, en hval kan tage med sig i dybet skalerer også isometrisk med størrelsen – altså dobbelt størrelse betyder dobbelt så meget ilt.

»Et menneske på 50 kilo kan – hvis det er en, der virkelig har trænet det – holde vejret i fem minutter. En stor kaskelothval på 50 ton kan – alene fordi den er 1000 gange større – holde vejret 10 gange længere, altså omkring 50 minutter,« siger Peter Teglberg.

»Man vil måske tænke, at det er da helt vildt at kunne holde vejret i en time! Men det er det faktisk slet ikke, når man forstår, hvordan fysiologisk skalering virker.«

Er der fraktalteori på spil?

Men hvad ligger egentlig bag den biologiske nødvendighed af at skalere stofskiftet med kropsvægten?

Dybest set handler det om, at stofskiftet i alle levende organismer er baseret på de samme principper, der allerede var på plads i de tidlige stadier af livets udvikling. Cellernes fælles energigrundlag ved kemiske processer er således det energirige molekyle ATP.

Og når kulhydrater nedbrydes til CO_2 og H_2O i en organisme, er energiuudbyttet nøjagtigt det samme, uanset om det foregår i en amøbe eller en blåhval.

Når molekyler og energiuudbyttet er det samme, må organismene justere deres opbygning og processer til konsekvenserne af forskellig størrelse. Faktisk er en konsekvens af det fælles udgangspunkt, at biologisk mangfoldighed i høj grad skyldes forskel i størrelse.

En mere tricky ting at forstå er, hvorfor stofskiftet netop vokser med kropsvægten opløftet til potensen 0,75.

»Nogle forskere mener, at det har med fraktalteori at gøre. Vores celler forsynes jo af ilt via blodkar, der forgrener sig i en hierarkisk struktur. Jo større, du bliver, jo flere gange skal blodkarrene forgrene sig. Men der er simpelthen grænser for, hvor stort et strukturelt spænd, det størrelsesmæssigt er muligt at lave blodkar i. Det betyder, at cellerne yderst i netværket på et stort dyr – ja, de må bare finde ud af at lave stofskifte, som passer med den mængde ilt, de kan få,« fortæller Peter Teglberg.

Ingen nedre grænse for stofskifte?

Peter Teglberg mener, at det er meget sandsynligt, at forsyningsteori – som fraktalteori i denne sammenhæng i praksis er – kan sætte nogle øvre grænser for, hvor højt et stofskifte, man kan have – særligt når man bliver meget stor.

»Men det, vi kan vise med de store hvaler er, at ingen af dem energimæssigt er "dyre" per kilo kropsvægt. Og det skyldes næppe, at de er begrænset af fraktalteori, for der er et ret stort spænd i det stofskifte, vi ser hos forskellige store hvaler med samme størrelse. De er alle sammen energimæssigt billige, men nogle er meget billigere end andre. Så mens man kan argumentere for, at forsyningsteori sætter nogle øvre grænser for, hvor højt et stofskifte et stor ensvarmt pattedyr kan have, er der måske ikke en tilsvarende nedre grænse for, hvor lavt et stofskifte, det kan have,« siger Peter Teglberg.

Uanset hvor de teoretiske grænser måtte være, er det interessant at studere, hvordan hvalerne udnytter det "mulighedsrum", som de rent fysiske grænser sætter.

Og at forstå hvalernes energibehov har ikke kun akademisk interesse, mener Peter Teglberg.

»Når vi ved, hvad det "koster" at være en hval, kan vi også blive bedre til at forstå, hvilke konsekvenser vores påvirkning af deres miljø kan få for de forskellige arter af hvaler med forskellige sultepotentialer. Jeg håber, at det kan være med til at gøre os til bedre naboer til havs med disse fantastiske megarovdyr« slutter Peter Teglberg. ■

VIDERE LÆSNING

Goldbogen, A., Pyenson, N.D. & Madsen, P.T. (2023): *How Whales Dive, Feast, and Fast: The Ecophysiological Drivers and Limits of Foraging in the Evolution of Cetaceans*. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 54:307–25.

Goldbogen, A & Madsen, P.T. (2018): *The evolution of foraging capacity and gigantism in cetaceans*. Journal of Experimental Biology 221, jeb166033. doi:10.1242/jeb.166033.

Rojano-Doñate L. et.al. (2018): *High field metabolic rates in harbor porpoises*. J. Exp. Biol. 221. doi: 10.1242/jeb.185827

Læs mere om sammenhængen mellem stofskifte og kropsstørrelse: Sand-Jensen, K. (2000): *Naturens mønstre*. Aktuell Naturvidenskab nr. 3.

Kapløbet om kvantecomputeren

Der foregår i øjeblikket et globalt kapløb om at udvikle en kvantecomputer, der kan bruges til noget interessant. I det kapløb står forskerne både overfor spændende faglige udfordringer og benspænd på grund af en anstrengt geopolitisk situation.

■ Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab



KLAUS MØLMER

Professor ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Han forsker i atomare systemers vekselvirkning med lys og deres anvendelse i kvantesensorer og kvantecomputere.

klaus.molmer@nbi.ku.dk

Klaus Mølmer holder foredrag om kvantecomputere i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab den 20. oktober. Foredraget streames til lokationer over hele landet. Se www.ofn.dk

I 1920'erne og 30'erne valfartede fremtrædende forskere fra hele verden til det kreative fysikmiljø omkring Niels Bohr i København. Her blev teorierne om atomernes mærkelige opførsel – kvantemekanikken – udviklet i en åben idéudveksling mellem store hjerner.

I årene derefter, især ved opblussen af 2. Verdenskrig blev det dog klart, at en forståelse af atomernes verden havde konsekvenser langt udover rent akademisk interesse for materiens natur. Mange af de forskere, der deltog i udviklingen af kvantemekanikken, kom således også til at deltage i udviklingen af atombomben – på forskellige hold.

Lige siden har dette dilemma mellem fri udveksling af idéer, og hemmeligskræmmeri på grund af forskningens militære, men også kommercielle, betydning, været et vilkår for "atom-forskningen" i bred forstand.

Det nye store slag om at komme først står nu om kvantecomputeren.

Klaus Mølmer står populært sagt midt i "slaget". Han er professor i kvantefysik ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet, hvor han forsker i kvantecomputere. Aktuel Naturvidenskab har mødt ham til en snak om, hvordan den store opmærksomhed om kvanteforskningen påvirker hele feltet.

Kvantecomputere laver stadig for mange fejl

Kort fortalt er en kvantecomputer en computer, der bruger atomare kvantetilstande til at regne på mange tal på samme tid. Regneenheden i en kvantecomputer er såkaldte kvantebits (qubits). Sammenlignet med en bit i en klassisk computer, der kan være i tilstanden enten "0" eller "1", glimrer en kvantebit ved også at kunne optræde i begge tilstande samtidigt. En kvantecomputer bygger altså på kvantemekanikkens mærkværdige

fænomener, der intuitivt kan være svære at forstå, men meget konkret kan udnyttes i teknologi.

Der foregår i øjeblikket en intens konkurrence på tværs af lande og mellem teknologigiganter som Google, IBM og Microsoft samt masser af nyopstartede virksomheder om at bygge en fungerende kvantecomputer. Der er forskellige teknologiske tilgange til at bygge de kredsløb – eller kvantechips – der er hjertet i en kvantecomputer. For eksempel superledende kredsløb, ionfælder, fotoniske chips eller neutrale atomer fanget i gitre af laserstråler. Fælles for dem er, at det gælder om at få sin kvantechip til at fungere med så mange kvantebits som overhovedet muligt – mindst en million, hvis man spørger Google. På nuværende tidspunkt har de cirka hundrede fungerende kvantebits i deres kvantechips, så der er lang vej igen.

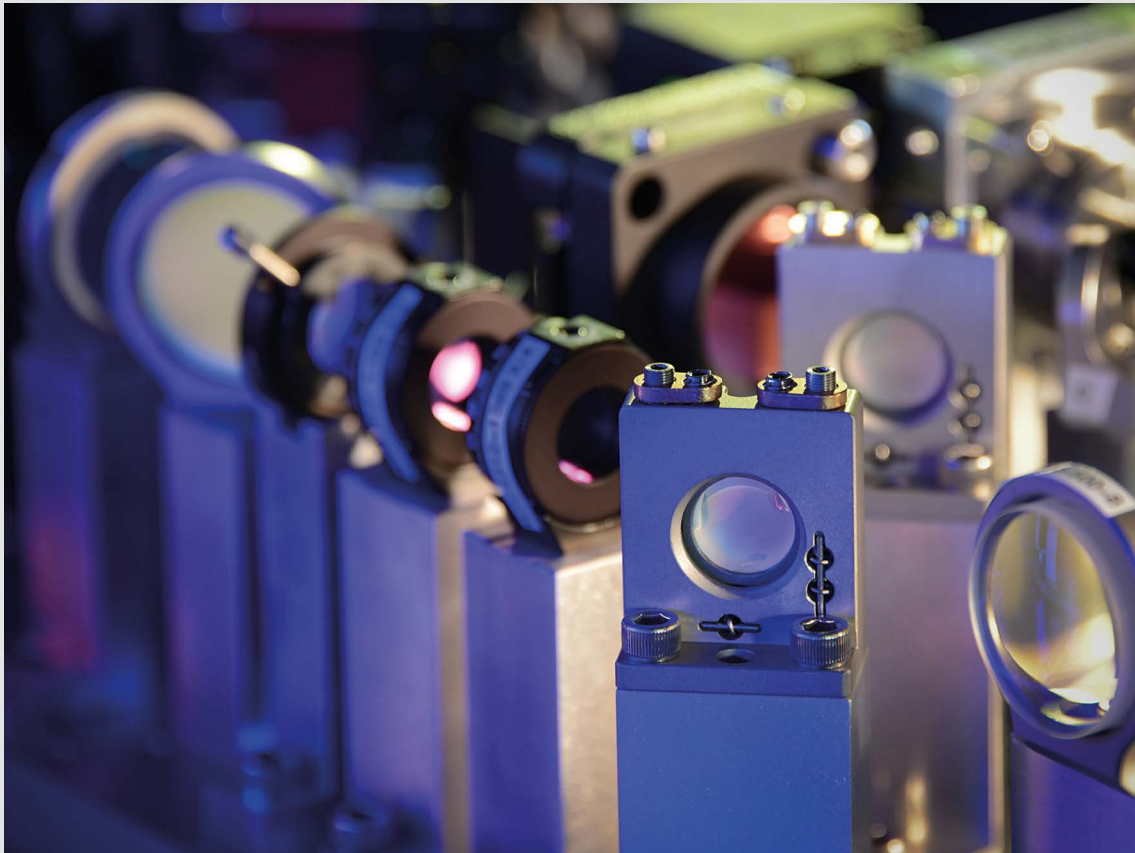
Men at øge antallet af bits på chippen er i virkeligheden ikke det største problem ifølge Klaus Mølmer:

»Problemet er, at disse kvantecomputere laver cirka 1 procent fejl i hver kvantebit i hver regneoperation. Vi vil jo gerne løse svære opgaver med kvantecomputeren, og til svære opgaver skal vi lave rigtig mange regneoperationer. En fejlrate på 1 procent betyder derfor, at vi ikke rigtig kan bruge dem til noget,« siger han.

På trods af mange års forskning og udvikling er vi altså stadig i dag ikke et sted, hvor man kan bruge en kvantecomputer til at løse problemer af praktisk interesse.

Kvantecomputeren som kodebryder

Det faktum gør dog ikke Klaus Mølmer til pessimist angående perspektiverne i kvantecomputerne, for der er virkelig sket meget på området de senere år. Men han medgiver,



Udsnit af den interne optik i Atom Computing's kommercielle kvantecomputer. Det er netop sådan en, den danske virksomhed QuNorth (etableret i fællesskab af EIFO og Novo Nordisk Fonden) har købt. Kvantecomputeren kaldet Magne ventes klar til brug omkring årsskiftet 2026/2027.

Foto: Atom Computing

FEJLRETNING ER DEN STORE NØD AT KNÆKKE

Når dagspressen omtaler nye resultater med kvantecomputere, handler det typisk om, at nu har en kvantecomputer lavet en beregning, som hvis den skulle foregå på en klassisk computer, ville tage en million år. Det er det, man kalder "quantum advantage" – dvs. beregninger, hvor kvantecomputeren har en principiel fordel sammenlignet med en klassisk computer.

At kvantecomputeren faktisk ikke har løst noget interessant problem, og at den laver fejl, som i praksis vil gøre beregningerne ubrugelige, springer presseomtalerne mere let henover.

En af de væsentligste nødder at knække for forskningen er at nedbringe fejlraten. For nylig har Google for eksempel kunnet vise, at de har fået deres 100 kvantebits til – i stedet for at regne forkert med 100 bits – blot at huske én fælles bitværdi tre gange længere end de enkelte kvantebits på chippen kunne gøre det. Når dette resultat kom i *Nature*, skyldes det netop, at det er et eksempel på, hvordan man kan korrigere fejl, der sker i kvantecomputeren. Men det indebar også, at chippen nu kun holder en enkelt kvantebit og derfor er meget langt fra nogen form for "quantum advantage". Den del af historien fyldte ikke meget i pressen.

Kvantechips, der ikke laver fejl, bliver derfor en afgørende konkur-

renceparameter. Den pointe kan illustreres med, at IBM i 2019 udgav et såkaldt road map, der fremskrev udviklingen af deres kvantechip de kommende år. Det leverede de på med en chip med cirka 400 qubits og senere 1100 – endda til tiden. Men chippen lavede for mange fejl. Her i 2026 lagde IBM så pludselig roret hårdt om og startede nærmest helt forfra med en chip, hvor fejlraten er reduceret markant, men også med et nyt road map med længere tidshorisonter.

Til sammenligning var anvendelsen af neutrale atomer til kvantebits i starten langt bagud, fordi det var en svær teknik. Men pludselig knækkede forskerne koden til at fange atomer – så der nu findes forskningsgrupper, der bruger 5-6.000 atomer, som hver udgør en bit. De er langsommere end for eksempel superledende kredsløb, men til gengæld laver de færre fejl. Kvantecomputeren Magne, som er indkøbt til Danmark fra det Amerikanske firma Atom Computing, benytter sådanne atomer og har elementer af fejlretning, sådan at den bruger 1200 fysiske kvantebits til at danne 50 fejlkorrigerede logiske kvantebits.

Hvilken teknologisk platform, der vil føre til det store gennembrud for kvantecomputere, er således langt fra afgjort.

at der er meget "hype" om kvantecomputeren i forhold til, hvor interessante ting de faktisk er i stand til at regne på i dag.

Det, der i høj grad fik verdens øjne op for kvantecomputerens potentiale, var da matematikeren Peter Shor i 1994 udviklede en algoritme, som ville kunne bruges på en kvantecomputer til at faktorisere store tal. Med denne ville man potentielt kunne bryde den kryptering, som hele internettet var bygget på.

»Det hoppede hele verden op og ned over. Men det førte også til en bekymring, som så også har drevet en del af hypen over kvantecomputere. Bekymringen over vores datasikkerhed er sådan set nem at imødekomme: Der findes alternativer, som ikke kan knækkes af Shors algoritme, og som allerede er i brug i nogle internetbrowsere og mobiltelefoner i dag,« siger Klaus Mølmer.

Klaus Mølmer fortæller, at der siden Shors algoritme og en algoritme til hurtig søgning af databaser fra 1997 ikke rigtig er blevet udviklet tilsvarende, epokegørende algoritmer til kvantecomputere, som vil kunne bruges til at løse interessante problemer.

»Det hænger selvfølgelig til dels sammen med, at det kan være svært at få datalogi-institutter til at dedikere sig til den opgave, når der endnu ikke findes hardware, algoritmerne kan køre på,« siger han.

Store summer i spil

Den store interesse for kvantecomputeren har udmøntet sig i, at både store og små lande nu har en national strategi på området, at der er opstået talrige "spin out-virksomheder" ud af universiteternes kvanteforskning, og at der investeres milliarder af kroner i de store techvirksomheder.

»For små lande som Danmark handler kvantestrategien meget om, at "vi skal også være med", og hvordan man navigerer i forhold til det internationale. For det har længe været klart, at det ikke kan være en global konkurrence, man som lille land kan vinde på egen hånd,« siger Klaus Mølmer.

For ikke at gentage historien om udviklingen af de elektroniske computere, hvor de europæiske lande i dag er kunder og ikke leverandører, er der nu oprettet store europæiske og nationale programmer i forskning i kvanteteknologier, også i Danmark.

»Det er en spændende udvikling og præcis, hvad vi drømte om i 1990'erne, da vi foreslog at den abstrakte kvantefysiks særeste elementer kan udnyttes i praktiske kvanteteknologier,« siger Klaus Mølmer.

Der er for ham og hans kolleger intet nyt i, at grundforskning kan føre til anvendelser, og heller ikke i at produktudvikling i virksomhederne sker med langt større budgetter og under andre spilleregler end i universiteternes forskningsmiljøer.

»Der er jo store økonomiske interesser på spil, ligesom der også er væsentlige hensyn til vores teknologiske uafhængighed af andre stater og i sidste ende vores nationale sikkerhed,« siger Klaus Mølmer.

»Virksomheder og myndigheder skal naturligvis beskytte deres teknologier og strategier, men for netop kvanteområdet er der et ekstra element af "skæg og blå briller", fordi Shors algoritme jo netop handlede om at knække koder og dermed bryde datasikkerhed. Og som med al teknologi, vil der også kunne være militære anvendelser; kvanteteknologier byder ikke på nye bomber, men de kan muligvis forbedre en række overvågnings- og styresystemer.«

Misser Europa kvanterevolutionen?

Klaus Mølmer fortæller, at han i virkeligheden ikke er urolig for, hvad en fremmed magt rent militært vil kunne bruge kvanteteknologier til mod os.

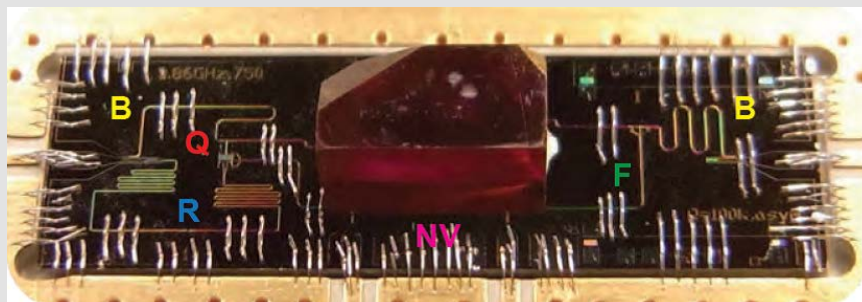
»Forsvarsmyndighederne er på vej væk fra kommunikation, der kan brydes med Shors algoritme, og kvanteteknologiernes bidrag til overvågning og dataanalyse er få blandt mange løbende forbedringer af de samme funktioner med klassiske teknologier og kunstig intelligens. Kvantecomputeren er ikke en generel supercomputer, men har kun en potentielt stor fordel ved meget specielle kvantealgoritmer. Jeg er derfor meget mere urolig for vores fremtidige konkurrenceevne og velfærd, hvis andre lande finder anvendelser af kvantecomputeren, for eksempel i deres kemiske og højteknologiske industrier,« siger han.

Man kan sige, at Europa missede IT-revolutionen, idet Europa i dag er helt afhængig af amerikansk soft- og hardware, mens computerchips bliver fremstillet i Asien. Der er derfor ifølge Klaus Mølmer ikke noget at sige til, at man i Europa tænker: Det skal ikke ske igen for kvanteområdet.

»Men det tror jeg desværre, at det kommer til,« siger han. »I hvert fald har man i Danmark valgt at købe en amerikansk kvantecomputer i stedet for at "teame up" i et fælleseuropæisk samarbejde om at bygge en selv. Og vi kommer næppe til at se en fælles europæisk front, der vil være i stand til at rejse lige så mange penge, som der er i det amerikanske "økosystem". Derfor er det også svært at se, at det er os, der får lederskabet i forhold til en



Fremvisning af kvantecomputer fra IBM ved en telekommunikationskonference (ITUWTS) i Delhi 2024. Foto: Dev Jadiya/CC BY-SA 4.0



I et superledende elektrisk kredsløb løber der svage kvantestrømme, som kan bruges til kvanteberegninger. På billedet er en få millimeter stor diamant (den lille klods) placeret ovenpå kredsløbet. Den kan lagre de svage elektriske signaler og dermed bruges som "kvante-harddisk. Teorien bag denne ide er udviklet af Klaus Mølmer, og forskere i Europa, Asien og USA har realiseret den. Illustrationer: Klaus Mølmer, Aarhus Universitet.

fremtidig global økonomi omkring kvanteteknologier.»

Han mener dog ikke, at vi skal fortvivle af den grund:

»De kraftigste computerchips i verden laves i dag på avancerede maskiner fra ASML i Holland, og danske virksomheder skal nok få kontrakter og økonomiske muligheder i den globale økonomi, ikke mindst takket være den stærke grundforskning, den målrettede satsning på basale teknologier og komponenter og den professionelle rådgivning til nye virksomheder i Danmark.«

Når geopolitik påvirker forskningen

Klaus Mølmer fortæller, at dykker man ned i de forskellige undermiljøer indenfor feltet – dvs. dem der laver grundforskning i ionfælden fysik, atomfysik mv – er der en udbredt følelse af, at de faglige udfordringer er store, og at man hellere vil se feltet "komme i mål" end komme ud i en destruktiv konkurrence.

»Vi kender jo hinanden personligt hen over fag- og landegrænser. Vi var hinandens studerende og postdocs og faglige vejledere, og vi samarbejder stadig intenst i grundforskningsmiljøerne, fordi det accelererer vores egen forskning og hjælper til at den hurtigt bliver anvendt og får kollegial anerkendelse,« siger han.

»Samtidigt med, at jeg anerkender myndigheders og virksomheders behov for at beskytte og hemmeligholde strategier og teknologier, har jeg og alle de kolleger, jeg taler med, en stor bekymring for, at der for tiden lægges hindringer i vejen for samarbejder indenfor grundforskningen. Grundforskning er et stort puslespil, som lægges hurtigere, hvis alle lægger deres brikker, så hurtigt de kan. Det sker specielt ved, at vi rejser ud i verden og udveksler studerende.«

Politikerne taler i dag om en ny geopolitisk situation med en altomfattende boykot af Rusland og Hviderusland på grund af krigen i Ukraine, og hvor vi skal være forsigtige med relationerne til Kina. De tre lande er, sammen med Iran, på eksplicitte lister, hvor der i dag er indført særlige sanktioner ved besøg og ansættelser ved danske universiteter.

»For mig betyder det for eksempel, at jeg ikke kan have en gæst indenfor til en kop kaffe, uden der skal være en sikkerhedsvurdering, og selv ved ansættelse af danskere ved min afdeling skal de gennem en ekstra vurdering, hvis de har samarbejdet med forskere fra disse lande,« siger Klaus Mølmer.

Mens Rusland, Hviderusland og Iran ikke repræsenterer teknologiske rivaler og i højere grad er underlagt en udenrigspolitisk bestemt boykot, skyldes restriktionerne overfor Kina mere frygten for uønsket vidensoverførsel. Og det er restriktionerne i forhold til Kina, der giver Klaus Mølmer og hans kolleger flest hovedbrud, fordi Kina er en kilde til studerende og forskere af højeste internationale kvalitet – også indenfor kvanteområdet.

Når berøringsangsten overfor Kina betyder, at man for eksempel ikke kan invitere kinesiske studerende med på kurser, hvor man blot underviser i, hvad der står i lærebøgerne, bliver det helt tosset, synes han.

»Jeg og mange af mine kolleger så derfor gerne, at vi får en bedre vurdering af, hvor restriktionerne giver mening, og hvor de ligefrem skader os. Universiteterne publicerer jo under alle omstændigheder deres grundforskning vidt og bredt, og de fleste forskningsgrupper vil på et øjeblik kunne fortælle, om de ville lide tab ved, at der blev lækket information om deres arbejde. Jeg tror, det vil være undtagelsen frem for reglen,« siger Klaus Mølmer.

Dansk forskning er afhængig af talent udefra

Klaus Mølmer er klar over, at det nemt kan komme til at lyde som om, at universitetsforskere som ham er blåøjede, og ukritisk vil fortælle, hvad som helst til hvem som helst. Men sådan mener han det selvfølgelig ikke.

»Selvom jeg er grundforsker, er jeg da også så praktisk indrettet og så "dansk i hjertet", at skulle jeg få en genial idé, som jeg tænker vil kunne give dansk industri eller det danske beredskab et forspring, vil jeg selvfølgelig gå til universitetets Technology Transfer Office og til relevante myndigheder for at få en vurdering, før jeg bare buser ud med det offentligt,« siger Klaus Mølmer.

»Men når jeg bare har fundet et nyt forskningsresultat til det store puslespil, vi alle er i gang med, og hvor jeg også selv har haft brug for de andres brikker, er det jo bare med at komme ud med det og sætte Danmark på verdenskortet.«

Han illustrerer idealet om den åbne forskning med et eksempel:

»Man kan med atomer og lasere detektere meget svage radiobølgesignaler. Det har masser af potentielle, og måske også militære, anvendelser. Efter årtiers forskning var de fleste laboratorier nogenlunde lige gode til det. Men så var der pludselig en ung forsker på Shanxi University i Kina, som fandt en måde at gøre den metode tusind gange mere følsom – en rigtig god idé, som han publicerede i *Nature Physics*. Den artikel er nu citeret 800 gange, og man bruger hans metode i hele verden. Jeg synes da, at Verden er blevet et bedre sted af, at vi alle sammen har fået hurtig adgang til den metode, fremfor hvis han havde gemt den for sine vestlige kolleger,« siger Klaus Mølmer.

»Niels Bohr opbyggede i sin tid meget bevidst sit institut som et internationalt institut, fordi

svære problemer kræver de bedste hjerner fra hele verden at knække. Vi er stadig internationalt relevante på kvanteområdet, fordi forskningen stadig foregår i den ånd,« siger Klaus Mølmer.

»Hvis jeg må sige nej til at ansætte den dygtigste forsker, der søger en stilling i min forskningsgruppe, fordi hun er fra Kina, kan vi også med tiden blive mindre interessante for forskere fra alle mulige andre lande. For de kigger jo på, hvad der bliver publiceret fra vores institutter, og hvis kvaliteten ikke er i top, ja så søger de også andre steder hen.«

Klaus Mølmer er meget bekymret for, om man på det politiske niveau forstår denne konsekvens: At jo mere, vi vælger at beskytte vores viden, jo mindre bliver der også at beskytte. ■

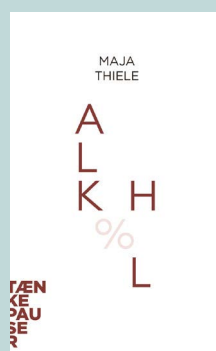
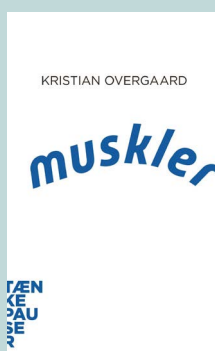
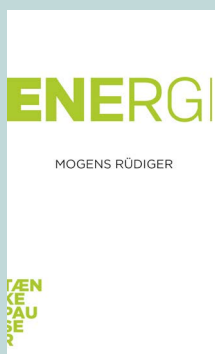
VIDERE LÆSNING

Du kan læse mere om princippet i en kvantecomputer og Klaus Mølmers forskning i artiklen: **Fra kvantefysik til kvantecomputere**, *Aktuel Naturvidenskab* nr. 6-2022.

Mere om kvantecomputere, og hvordan de fungerer: **Hvad kan man regne på en kvantecomputer i dag?** *Aktuel Naturvidenskab* nr. 2-2020.

SMÅ BØGER, STORE TANKER

På kun 60 sider formidler forskere deres viden om netop det, de ved mest om.



Køb Tænkepauser med
30 % rabat på unipress.dk

Brug koden

ANTP

i købsprocessen.

Gælder t.o.m. 30/11 2026.
Prisen er eksklusiv fragt.

Til Offentlige foredrag i Naturvidenskab den 3. november 2026 kan du opleve forfatter Kjeld Hermansen, der har skrevet Tænkepausen *Kaffe*.

Kaffens biologi

Kaffe er en af verdens mest populære drikke. Men dyrkning af den dominerende kaffesort "Arabica" trues af klimaforandringer. Kom med på en rejse gennem kaffens biologi, fra det etiopiske højland til koppen, og mød de vilde arter, der kan sikre fremtidens kaffeforsyning.

■ Af Anders S. Barfod



ANDERS S. BARFOD

Anders S. Barfod er lektor emeritus ved Institut for Biologi på Aarhus Universitet. Han er tilknyttet AU Herbarium, Steno Museerne ved Aarhus Universitet. Han forsker i tropiske planteressourcer med fokus på mangofamilien og palmer.

anders.barfod@bio.au.dk

Anders Barfod holder foredrag om kaffe i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab den 3. november. Læs mere på www.ofn.dk.

Der er ikke mange tropiske afgrøder vi nærer så dybe følelser for som kaffe. Den er blevet en integreret del af vores sociale samvær og genstand for stor opmærksomhed. Hver dag bliver der drukket sådan cirka 2,25 milliarder kopper kaffe jorden over. Vi jagter den perfekte kop "Arabica", samtidig med at vi frygter for dens fremtid i en verden i stadig klimaforandring.

Men hvad ved vi egentlig om kaffens biologi, hvilke planter er den beslægtet med, hvor vokser den vildt, og hvad er grundlaget for fremtidens forædlingsarbejde? Det ser jeg nærmere på i denne artikel.

Kaffeplantens botanik

Kaffeslægten, *Coffea*, tilhører Krapfamilien, hvis videnskabelige navn er Rubiaceae. Det er en stor familie med cirka 13.400 arter, som hovedsageligt findes udbredt i den tropiske zone, med få udløbere ind i køligere egne. I Danmark er familien repræsenteret ved 13 arter, som alle er urter af beskeden størrelse. Langt de fleste tropiske repræsentanter for familien er dog buske og træer ligesom det er tilfældet med kaffe. Udover kaffeslægten omfatter familien relativt få nyttearter. Vigtigst er nok Cinchona-slægten, som på dansk hedder kinatræer, fra Andesbjergene, som omfatter 24 arter af træer. Fra barken ekstraheres bitterstoffet kinin, som har været anvendt i behandlingen af malaria og, i små mængder, som smagstilsætning til tonicvand.

Et stærkt familiekenndetegn er de modsatstillede blade, altså blade som sidder parvist overfor hinanden på stænglen. Ved bladstilens fod sidder to små bladlignende dannelser, såkaldte fodflige. Det specielle ved familien er, at disse fodflige vokser sammen to og to på tværs af den bladbærende stængel. De kan falde af hurtigt, efter de er dannet, men så efterlader de et tydeligt ar, som kan erkendes som en kort vandret streg på stænglen mellem de to blade.

Kaffe tilhører en slægt, som bærer det videnskabelige navn *Coffea*. Den omfatter i skrivende stund mere end 130 arter. De seneste 40 år er den botaniske udforskning blevet intensiveret, hvilket siden årtusindeskiftet har resulteret i beskrivelse af 30 nye arter, som tidligere var ukendte for videnskaben. Det skal dog bemærkes, at mange af disse "nye" arter er velkendte og navngivet af lokalbefolkningerne. Især på øen Madagascar har forskningen afsløret mange videnskabeligt ubeskrevne arter.

Få arter bruges til fremstilling af kaffe

Det er relativt få arter, vi anvender til fremstilling af kaffe. Det drejer sig først og fremmest om vores elskede Arabica, som leveres af arten *Coffea arabica*. Den står for omkring 2/3 af kaffen på verdensmarkedet. En anden art *C. canephora* er kendt under handelsnavnet Robusta. Smagen regnes ikke for at være helt så elegant som Arabica, og så har den måske også lidt navnet imod sig. I hvert fald er der kafferisterier, som hævder, at den er lige så god som Arabica, hvis man rister den korrekt.

Robusta-kaffe er 2-3 gange så rig på koffein som Arabica, og så efterlader den en cremet substans på overfladen af kaffen. Den bruges især til at blande i espresso-kaffe og til instant-kaffe.

I Sydøstasien og Afrika bruger man to yderligere arter til at fremstille kaffe: *Coffea liberica* (Liberica) og *C. dewevrei* (Excelsa). Sidstnævnte art blev tidligere anset som en underart af *C. liberica*, men et nyt studie baseret på DNA-sekvensanalyser afslører, at *C. dewevrei* er en selvstændig art.

Et andet nyligt studie har i øvrigt endegyldigt afsløret, at *Coffea arabica* opstod spontant for cirka 600.000 år siden som en kromosomfordoblet hybrid mellem to andre arter (*C. eugenoides* og *C. canephora*).

»Kaffen tilhører Krapfamilien, hvis videnskabelige navn er Rubiaceae. Det er en stor familie med cirka 13.400 arter.«



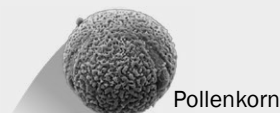
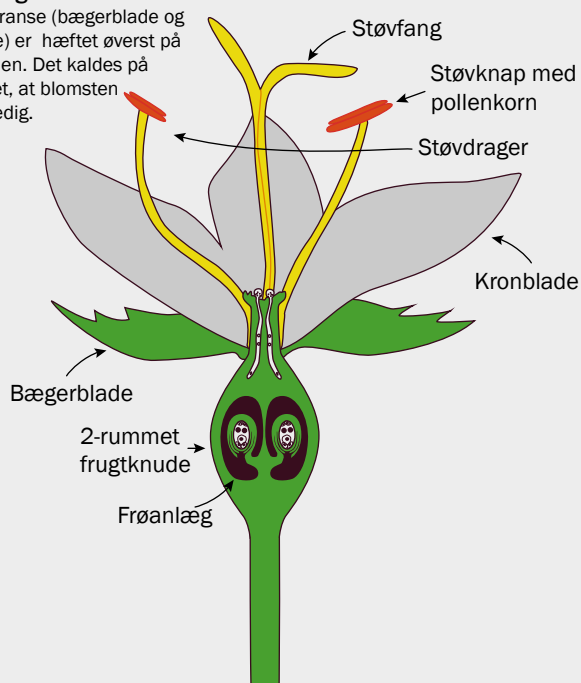
Fotos: Carsten R. Kjaer



KAFFEBLOMST OG -FRUGT

Opbygning af kaffebloomsten

De ydre kranse (bægerblade og kronblade) er hæftet øverst på frugtknuden. Det kaldes på fagsproget, at blomsten er oversædlig.



Griffel

Pollenrør
Spermcelle

Ægcelle

Dobbeltbefrugtning

Når pollenkornene lander på støvfanget, sender de et langt tyndt rør ned igennem griffelen (der teknisk er en forlængelse af frugtknuden). Røret når til sidst frem til munden af frøanlægget, hvor det trænger igennem, brister og afleverer to spermkerner. Den ene af disse fusionerer med ægcellen og danner zygoten (den første celle i den næste generation), som deler sig og danner kimen. Den anden spermkerne fusionerer med kernerne i frøanlæggets centralcelle og danner frøhvide (på fagsproget endosperm). Denne sindrige proces kaldes også for dobbeltbefrugtning og kendetegner stort set alle blomsterplanter.

Tværsnit af moden kaffefrugt

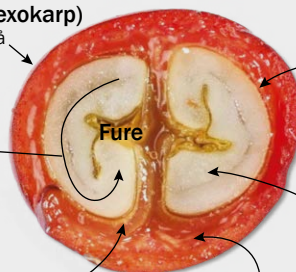


Arabica

Robusta

Under væksten ruller frøhviden sig sammen og danner den karakteristiske fure, vi kender fra kaffebønner. Furen er let S-formet hos Arabica og næsten ret på Robusta.

Overhud (exokarp)
"Skrællen" på kaffefrugten.



Endokarp

pergamentagtigt lag, som omslutter hvert af de to frø.

Frøhvide (endosperm)

Næringsvæv, der forsyner kimen (den spæde plante) med energi, når frøet spirer.

Slimlag

Den inderste del af frugtkødet er slimet og rigt på pectin og sukkerstoffer.

Frugtkød (mesokarp)

■ Fotos: Colourbox og Shutterstock.



Kaffefrugter høstes



Frugtskal inklusiv slimlag fjernes



Endokarp fjernes



Frøhvide klar til ristning



Ristet frøhvide = "kaffebønner" klar til at blive malet



Skovmærke (*Galium odoratum*). Foto: Anders S. Barfod

FORÅRSBEBUDER MED KAFFERELATION

I Danmark omfatter krapfamilien (Rubiaceae) 13 arter klassificeret i tre slægter. Elleve af disse tilhører slægten Snerre (*Galium*). Den mest kendte art er nok Skovmærke eller Bukkar (*Galium odoratum*). En forårsbebuder, som vokser i bunden af muldrige løvskove. Bladene sidder i 6-8-tallige kranse og de små, velduftende, hvide blomster er samlet i en elegant blomsterstand. Bladkransen er rent evolutionært opstået på den måde, at fodfligene ved grunden af de modsatstillede blade har vokset sig store og ikke længere kan adskilles fra løvbladene. Planten udsender en liflig duft af nyslået hø og vanilje ved knusning, hvilket har givet anledning til dens latinske navn, som betyder velduftende. I Danmark har den haft forskellige anvendelser, blandt andet i tørret form som luftfrisker. I England har man eksperimenteret med at anvende de piggede frugter af en anden art, Burrenerre (*Galium aparine*), til at brygge en koffeinlet kaffeerstatning, som går under navnet cleaver coffee. I modsætning til rigtig kaffe er det hele frugten, man rister og maler. Jeg har aldrig selv tilberedt eller smagt "burrekaffe", så jeg kan ikke komme med en anbefaling, og jeg vil heller ikke gøres ansvarlig for eventuelle forsøg i den retning.

Er man nysgerrig, kan jeg henvise til de opskrifter, der findes på nettet og i bogen *Wild and Sweet Book* skrevet i 2022 af den britiske forfatter Rachel Lambert (på engelsk udgivet af Hoton Mini Press. ISBN13: 9781914314155).

Kaffeforædlingens historie

Det er især *Coffea arabica*, som har været genstand for forædling. Arten stammer oprindeligt fra det etiopiske højland, hvor den forekommer naturligt i bjergskove i en højde omkring 1000 til 2000 meter over havet. I dag dyrkes den i bjergrige egne på tværs af tropene.

I modsætning til andre afgrøder, som er blevet forædlet væk fra det oprindelige udgangspunkt, er de dyrkede kaffearter meget tæt på deres vilde slægtninge. Forædlingen startede først for alvor i Brasilien i midten af det 20. århundrede. Den tog udgangspunkt i to dværg-mutanter af varieteterne *bourbon* og *typica*. Ved at fremavle genetisk rene linjer af disse øgede man i første omgang produktiviteten, senere også resistens mod den udbredte svampesygdom kafferust.

I løbet af 1970'erne skete der i Mellemamerika en veritabel grøn revolution indenfor kaffedyrkingen, da man fik succes med at krydse forskellige dyrkede kaffelinjer. I dag er udgangspunktet for forædlingen af *C. arabica* udover de to førnævnte dværgmutanter også varieteten *geisha*, en oprindelig type som blev indsamlet i 1936 i den bjergrige Gesha-region i det sydvestlige Etiopien. I første omgang blev den dyrket i Tanzania og Costa Rica. I løbet af 60'erne blev den indført til Panama, fordi den er resistent overfor kafferust. Her slog den i første omgang ikke rigtig an blandt kaffebønderne, da den ikke var særlig produktiv. Men det ændrede sig, da vestlige forbrugere begyndte at jage den perfekte kaffesmag.

I dag sælges *geisha*-kaffe til svimlende priser. I 2025 blev rekorden for dyreste kaffe således slået af en *geisha*-kaffe fra Panama (Hacienda La Esmeralda i Boquete-området). Den blev solgt til en indkøber fra Dubai for den nette pris af 30.204 US-dollars per kilo, svarende til mere end 192.000 kroner.

Klimaforandringer og fremtidens kaffe

De mange arter indenfor kaffe danner et solidt grundlag for fremtidens kaffeforædling. Og det er strengt nødvendigt, da de kaffeplanter, vi hovedsageligt dyrker, generelt er følsomme overfor klimasvingninger.

I Brasilien, som producerer omkring en tredjedel af al kaffe i verden, er kaffedyrkningsområderne flere gange blevet ramt af ekstremt vejr i forbindelse med vejrfænomenet el Niño. Det har forårsaget produktionstab og store prisstigninger på verdensmarkedet. De menneskeskabte klimaforandringer forudses i fremtiden at forstærke effekten af el Niño. Det vil få store konsekvenser for kaffedyrkingen i Brasilien, som leverer 40-50% af verdens Arabica-kaffe, og i Vietnam, som er den næststørste kaffeeksporterende nation i verden, hovedsageligt af Robusta-kaffe.

Resultatet vil blive store prisstigninger på kaffe, medmindre vi får fremavlet nye egenskaber i de dyrkede kaffeplanter, som gør dem mere modstandsdygtige overfor fremtidens vilde klima.

Det arbejde er heldigvis allerede i fuld gang.

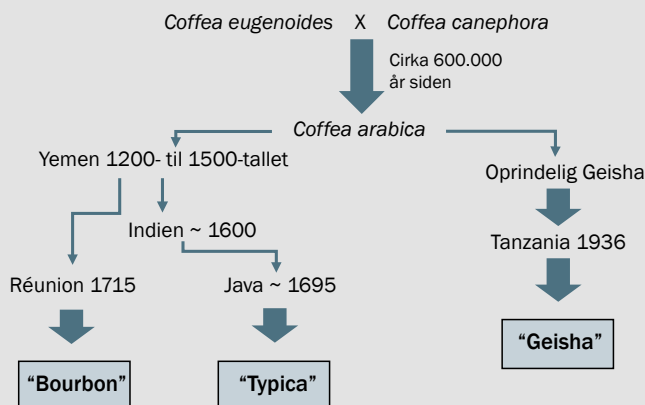
I den forbindelse kan de mere end 130 vildtvoksende kaffearter blive vores redning, da de kombinerer en række ønskelige egenskaber. Vi kan enten satse på nye arter og forædle disse, eller vi kan holde fast i de eksisterende arter og fremavle nye egenskaber ved at krydse dem med andre mere robuste arter.

En særlig interessant art i denne sammenhæng er den udryddelsestruede *Coffea stenophylla*, som man gen fandt i 2018 i Sierra Leone. Ikke alene leverer den en relativt velsmagende kaffe i forhold til arter, der dyrkes kommercielt, den forekommer desuden i lavere højde (150–700 m) og er mere modstandsdygtig overfor tørke og visse sygdomme.

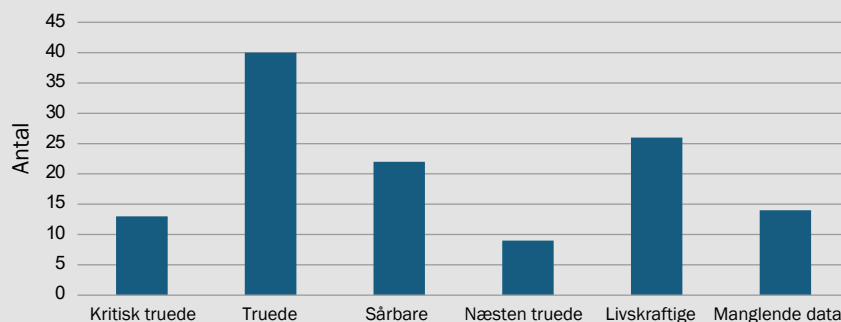
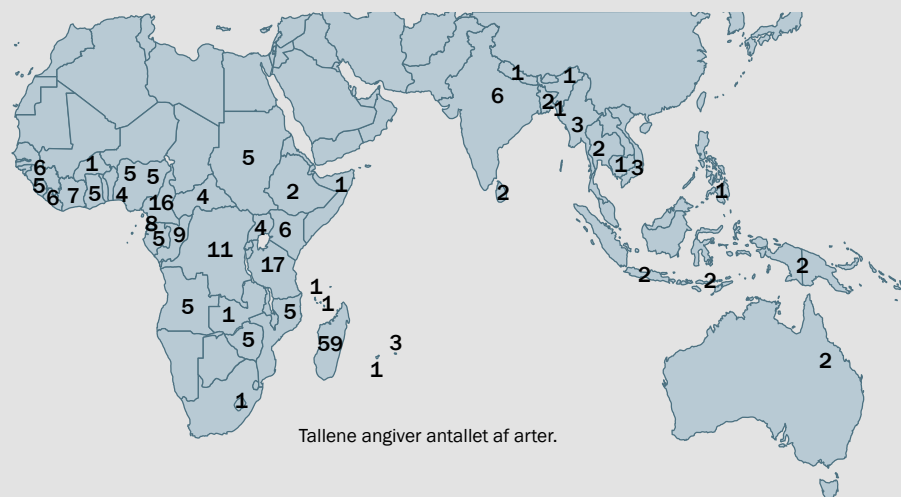
Fra blomst til kop

Kaffen, vi nyder, er resultatet af en biologisk reproduktionsproces, som starter med dannelse af blomsten. Samtlige arter af kaffe producerer hvide stjerneformede blomster. I midten af blomsten rager den såkaldte griffel frem. Den bærer støvfangene, hvor pollen-korn fra andre kaffebloomster bliver afsat af bestøvende insekter, hvorved der kan ske en befrugtning og efterfølgende dannelse af frø.

OPRINDELSE AF ARABICA-VARIETETERNE



HVOR FINDES DE VILDE KAFFEARTER I NATUREN?



Tilstanden af vilde kaffearter ifølge IUCN's trusselsklassificering. Samlet er der 75 truede arter, 35 ikke-truede arter og 14 arter, hvis bevaringsstatus er ukendt.



Kaffeblostm. Foto: Anders S. Barfod

FRØ ELLER AFLÆGGERE?

Man opformerer kaffebuske ved enten at tage aflægere eller udså frø. *Coffea arabica* bliver ofte frøformeret, da den er selvbestøvet. Det begrænser den genetiske variation og er garant for en vis ensartethed i afkommet. Hvis man vil være helt sikker på at fastholde plantens kombination af egenskaber i afkommet, må man opformere kaffebusken ved at tage aflægere, hvilket svarer til kloning. Lidt anderledes forholder det sig med *C. canephora*, som kun danner frø, hvis blomsterne bliver bestøvet af pollen overført fra andre planter, fortrinsvist via bier. Der betyder, at der er stor variation i denne art, og det kan være svært at udføre et målrettet forædlingsarbejde med frøformerede planter, medmindre man tager aflægere.

De senere år er en ny kloningsteknik kommet til, hvor man dyrker vævskulturer in vitro (dvs. i "reagensglas"). Denne teknik gør det muligt at masseproducere genetisk ensartet plantemateriale. Takket være et nyligt genembrud finder metoden nu stigende anvendelse indenfor kaffeforædlingen.

Det næringsrige væv inde i frøet – frøhviden (også kaldet endosperm) – er det, vi laver kaffe af.

Udviklingen af frugten tager cirka 6 måneder. Under væksten ruller frøhviden sig sammen og danner en karakteristisk fure, som vi kender fra "kaffebønner". Hos *Coffea arabica* er furen svagt S-formet, mens den er næsten ret hos *C. canephora*.

Når kaffefrugten, som botanisk set er et bær, er moden, består den yderst af en rød skal med frugtkød, hvor det inderste lag er slimet. Hvert af de to frø er omsluttet af et pergamentagtigt lag. Frøhviden udgør ved modenhed det meste af frøet.

For at få fat i frøhviden, skal man altså have fjernet skallerne. Det kan foregå ved, at frugterne tørres og efterfølgende afskalles – enten ved vådafskalning efterfulgt af en gæring, som fjerner det slimede lag af frugtkød, eller ved såkaldt honningbehandling, der er en kombination af tør- og vådbehandling. De senere år har man desuden eksperimenteret med at afskalle frøhviden ved hjælp af fermentering under iltfri forhold. Den valgte behandlingsmetode er traditionsbestemt og optimeret til de lokale forhold. For den enkelte kaffebonde er der meget på spil, for en fejlslagen behandling kan koste dyrt.

Når frøhviderne er færdigbehandlet og klar til eksport, er de grønne og omgivet af den hindeagtige frøskal (sølvhuden). Ved ristningen skaller denne mere eller mindre af. Den bliver sorteret fra, da den ikke bidrager positivt til smagen.

Set fra et rent botanisk perspektiv, er det, vi maler til kaffe, ikke en bønne, men frøhvide. Det ligner ganske vist de bønner, vi finder indenfor bælgplanterne, men her udgør de to halvkugleformede halvdele de opsvulmede kimblade.

Jeg erkender blankt, at betegnelsen kaffebønne har bidt sig fast og bliver svær at få udryddet. For hvem har lyst til at byde gæsterne på en kop ristet frøhvide!? ■

VIDERE LÆSNING

Aguilar, M. E. et al. 2022. Somatic embryogenesis of *Arabica* coffee in temporary immersion culture: Advances, limitations, and perspectives for mass propagation of selected genotypes. *Frontiers in Plant Science* 13 | 994578.

Baldwin, Y. et al. 2021. Phylogenomic analysis clarifies the evolutionary origin of *Coffea arabica*. *Journal of Systematics and Evolution* 59 (5): 953–963

Barfod, A., & Øllgaard, B. Olesen, B., Ravnkov, S., Steenberg, T., (2017). Øvelseskompendium i Eukaryoter | Alger, svampe og landplanter (3 udg.). Biologisk Institut, Aarhus Universitet.

Davis, A. P. 2020. Lost and Found: *Coffea stenophylla* and *C. affinis*, the Forgotten Coffee Crop Species of West Africa. *Frontiers in Plant Science* 11 | 616

Dias, C. G. et al. 2024. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. *Science of the Total Environment* 907 | 167753.

Hermansen, K. 2026. Kaffe. Tænkepauser. Aarhus Universitetsforlag. ISBN-13: 9788775971589

McCook, S., & Montero-Mora, A. 2024. Coffee breeding in a time of crisis: F1 hybrids in Central America since 1990. *Plants, People, Planet* 6(5): 1070–1079.

Fremtidens fødevarer vokser i havet

Presset på landjord og ferskvand stiger. Derfor giver det god mening, hvis flere af vores fødevarer i fremtiden kan baseres på tang fra havet. Tang kan produceres med lav klimabelastning og endda bidrage til et bedre havmiljø. Og så er det en både næringsrig og smagfuld råvare.

■ Af Sofie Laage Christiansen, Lone Thybo Mouritsen, Jessica Aschemann-Witzel, Marianne Thomsen og Annette Bruhn

OM FORFATTERNE



Sofie Laage Christiansen, ph.d., projektleder ved AlgeCenter Danmark, Kattegatcentret/Aarhus Universitet. slc@kattgatcentret



Marianne Thomsen, professor ved Institut for Fødevarevidenskab, Københavns Universitet. mth@food.ku.dk



Lone Thybo Mouritsen, leder for formidling og videnskab, Kattegatcentret. lm@kattgatcentret.dk



Annette Bruhn, seniorforsker ved Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet. anbr@ecos.au.dk



Jessica Aschemann-Witzel, professor ved MAPP Centre og Institut for Virksomhedsledelse, Aarhus Universitet. jeaw@mgmt.au.dk

Annette Bruhn holder foredrag om tang i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab den 17. november 2026. Læs mere på www.ofn.au.dk

Fisk, skaldyr og andre akvatiske fødevarer får stadig større betydning i den globale fødevareforsyning. Ifølge den nyeste rapport fra FN's fødevare- og landbrugsorganisation (FAO) om fiskeri og akvakultur nåede den samlede akvakulturproduktion i 2024 et historisk højt niveau på 142 millioner tons. Godt og vel en fjerdedel af produktionen var tang.

Ser man kun på den akvakulturproduktion, der foregår i havet, udgør tang over 50 %, og det er den akvakulturform, der vokser mest. Globalt er akvakulturproduktion af tang steget med 5,6 % om året i de seneste fem år og repræsenterer en værdi på 13,6 milliarder kroner. Størstedelen af tangproduktionen (99 %) sker i Asien, men EU har en strategi for øget selvforsyning, som også omfatter en målrettet indsats for at øge produktionen af tang i Europa. Tang til fødevareformål udgør 30–38 % af den samlede globale produktion, mens øvrige anvendelser for eksempel omfatter gødningsmidler, fodertilsætningsstoffer, kosttilskud, biogene materialer og biostimulanter.

Dansk produktion af havets grøntsager

Også i Danmark vokser produktionen og anvendelsen af tang. En kortlægning lavet af AlgeCenter Danmark har identificeret mindst 29 danske virksomheder, der arbejder med produktion (akvakultur og høst af vild tang) og anvendelse af tang til blandt andet fødevarer og foder, samt en følgeindustri, der udvikler dyrkningsteknologi.

Ud over de store virksomheder, der arbejder med tang som tekniske ingredienser til fødevareindustrien og har gjort det siden 1940'erne, er der i de to seneste årtier etableret mange mindre virksomheder. De fleste arbejder med tang til fødevarer, og størstedelen af den høstede tang i Danmark anvendes til fødevarer – som grøntsager fra havet. Det er primært sukkertang, men også søl og søsalat, mens de ikke-hjemmehørende rødalger *Asparagopsis* og *Bonnemaisonia* dyrkes i lukkede systemer på land til metan-reducerende dyrefoder.

Dyrkning af tang i Danmark er i de seneste 15 år blevet udviklet, testet og optimeret i tæt samarbejde mellem virksomheder og forskere fra stort set samtlige danske forskningsinstitutioner.

I havet dyrkes sukkertang på linesystemer nær kysten. Dyrkning af sukkertang er også blevet testet i offshore-områder, blandt andet i tre vindmølleparker i Østersøen og Nordsøen. På land sker der en udvikling af tangproduktion, som udnytter næringsstofferne fra land-



Sukkertang dyrket i Vattenfalls vindmøllepark ud for Hvide Sande i projektet WIN@sea. Foto: Teis Boderskov (Aarhus Universitet) og Mads Hecter (Kerteminde Seafarm).



Frisk søsalat er både flot og delikat, og kan fx bruges i stedet for spinat i mange retter eller i pesto. Foto: Sofie Laage Christiansen



Virksomheden PureAlgae udvikler skalérbare land-baserede systemer til dyrkning af tang, hvor tangen udnytter næring fra fx fiskeopdræt på land. Foto: PureAlgae og Anders Kavin.

MULTIBRUG - DYRKNING AF TANG I VINDMØLLEPARKER

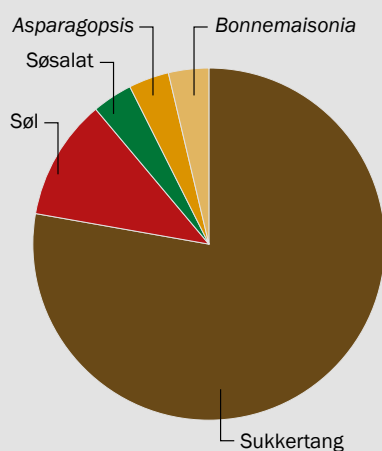
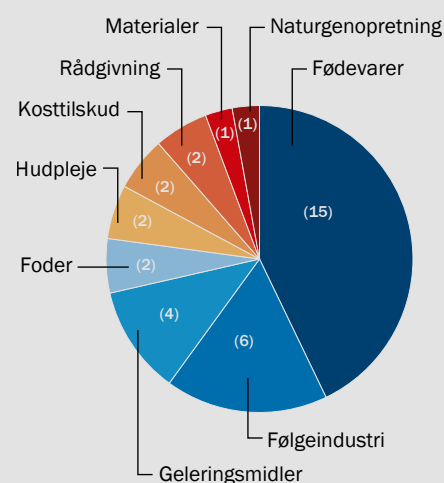
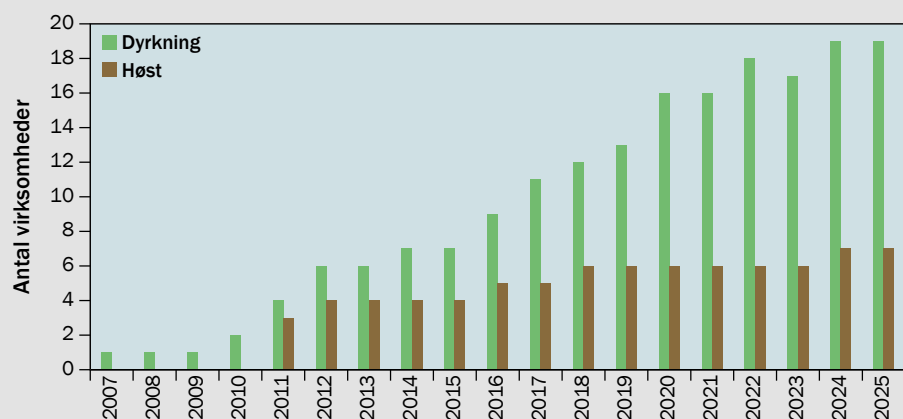
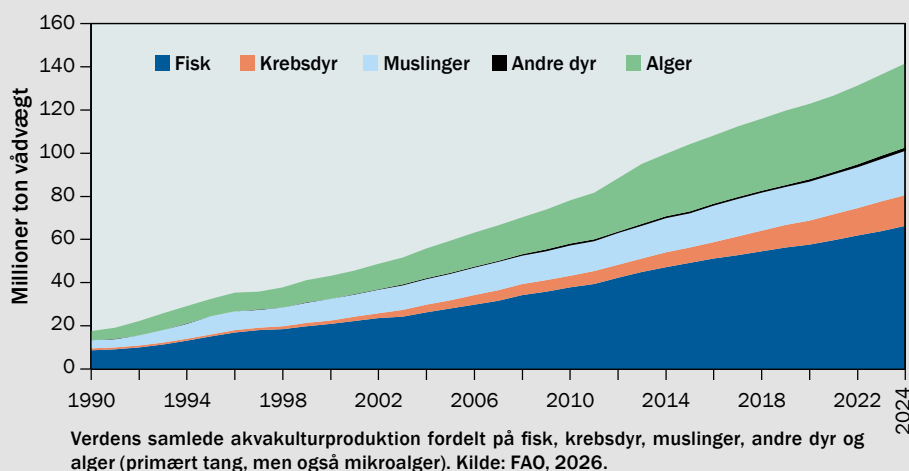
Grøn omstilling og behov for øget selvforsyning betyder, at der skal etableres langt flere havvindmølleparker, og at der er øget interesse for fødevareproduktion i havet. Samtidig er der krav om, at vi skal beskytte større områder af havet. En løsning, der forskes meget i, er "multibrug", hvor flere aktører deler pladsen, så man for eksempel udnytter pladsen mellem vindmøller på havet til at producere tang og muslinger. På den måde udnyttes pladsen bedst muligt, infrastruktur kan deles, og der kan skabes bedre muligheder for at etablere ubenyttet og beskyttet natur i havet. Projekterne WIN@sea, OLAMUR og ULTFARMS arbejder med multibrug til havs.

ALGECENTER DANMARK

AlgeCenter Danmark (ACDK) er et dansk forsknings-, innovations- og formidlingssamarbejde. Formålet er bl.a. at skabe fremdrift i den danske tangindustri. Se algecenterdanmark.com

HAVHAVER

Tang er ikke kun kommercielt og forskningsmæssigt interessant. Der etableres flere og flere maritime nyttehaver, hvor private i lokale fællesskaber dyrker og spiser tang og muslinger. Foreningen HAVHØST understøtter lokale initiativer og har i 2026 mere end 40 maritime nyttehaver i et landsdækkende netværk. Formålet er at fremme regenerativ dyrkning af havet, hvor produktionen samlet set har en positiv indvirkning på de omkringliggende marine økosystemer. Se mere på havhoest.dk



baseret fiskeopdræt. Den samlede produktion af tang i Danmark er endnu relativt lille (maks. 16 ton om året), men produktionen er klar til opskalering, når fødevarereproducen-terne vil bruge mere tang. Det er her, udfordringen ligger: Hvordan får vi danskerne til at spise mere tang?

Der er mange gode grunde til at spise mere tang. Tang kan smage godt, bidrage med ernæringsmæssigt værdifulde stoffer og dyrkes på måder, der optager næringsstoffer fra havmiljøet. Anvendelsesmulighederne er mange, og tang rummer et markant kulinarisk og ernæringsmæssigt potentiale, som gør den relevant i helt almindelig hverdagsmad.

En sund råvare

Ser man på tang i et ernæringsmæssigt perspektiv, finder man en kompleks sammensætning af proteiner, fedt, kulhydrater, mineraler, vitaminer og bioaktive stoffer, som varierer betydeligt mellem de forskellige arter. Variationen skyldes genetiske forskelle mellem arter, men afhænger også af både voksested og tidspunktet for høst.

Nogle arter er ernæringsmæssigt interessante, fordi de indeholder relativt meget protein. Rødalger som søl (*Palmaria palmata*) og purpurhinde (*Porphyra*) har generelt det højeste proteinindhold på op til 15–30 % af tørstofindholdet, mens brune og grønne alger typisk indeholder henholdsvis 5–15 % og 10–25 %. Til sammenligning indeholder tørrede kikærter knap 25 % protein.

Tang indeholder også en række komplekse kulhydrater, såkaldte polysakkarider. Nogle fungerer som kostfibre og betragtes som gavnlige for kroppen. Brunalger indeholder blandt andet alginat og fucoidan, rødalger indeholder carrageenan og agar, mens grønalger indeholder ulvan og cellulose. Kostfibre understøtter en sund tarmfunktion.

Fedtindholdet i tang er generelt lavt (cirka 1 %), og det fedt, man finder i tang, er ofte flerumættede fedtsyrer, herunder omega-3 (EPA).

Tang er desuden rig på mineraler som jod, jern, calcium, kalium og magnesium, og endelig indeholder tang en række vitaminer og bioaktive forbindelser, herunder vitamin A, C, E og B-vitaminer, samt polyfenoler og carotenoider, der fungerer som antioxidan-

ter og forbindes med sundhedsfremmende egenskaber. Det høje indhold af jod i brunalger som sukkertang kan dog begrænse det anbefalede daglige indtag.

En smagfuld råvare

De mange forskellige tangtyper rummer til sammen en bred smagsprofil, som gør dem gastronomisk interessante. Nogle tangarter er naturligt rige på umami, og især søl er kendt for sin dybe "kødagtige" umamiprofil – en egenskab som er mindre udbredt i plantebaserede råvarer. Umami betragtes som den femte grundsmag, og tilsætning af tang til kødfrie retter, kan eventuelt gøre det mere tiltalende for inkarnerede kødspisere at spise mere grønt.

Ud over den eftertragtede umamismag kan tang have friske, grønne smagsnoter som agurk eller nøddeagtige aromaer som hasselnød, afhængigt af art, høsttidspunkt og behandling. I Vesten forbindes nogle arter af tang dog ofte med en smag af fisk eller hav. Det er en barriere for mange forbrugere.

Udfordringen er derfor ikke kun at fremhæve tangens positive smagskvaliteter, men også at reducere de aromaer, der kan holde mange forbrugere på afstand. Forskning viser, at forskellige former for forarbejdning kan ændre både tangens smag og indhold af for eksempel jod. Fermentering kan for eksempel ændre tangens kemiske og sensoriske profil markant, blødgøre tekturen, forstærke umamismagen, tilføje kompleksitet og samtidig nedtone den fiskelignende smag, som ellers kan begrænse anvendelsen af nogle tangarter. Fermentering gør tang mere mild, mere aromatisk og mere anvendelig i hverdagsmad – og er derfor et vigtigt redskab i arbejdet med at gøre tang til en attraktiv fødevarer. Blanchering, hvor tangen dyppes kortvarigt i meget varmt vand, kan reducere brunalgers relativt høje indhold af jod og samtidig ændre farven fra brun til en mere appetitlig frisk grøn farve, som vi kender den fra den importerede tangsalat, der er fremstillet af den asiatiske brunalge, wakame.

En bæredygtig råvare

Tang er en lovende ressource i den grønne omstilling. Ved dyrkning i havet optager den ikke landbrugsjord og kræver ikke vanding. Tangen optager desuden næringsstoffer fra havvandet, som fjernes fra havmiljøet, når

biomassen høstes. Når man dyrker sukkertang i havet, kan høsten fjerne op til 23 kg kvælstof per hektar med de dyrkningsformer, man bruger i Danmark i dag. Når man dyrker tang i systemer på land, kan man fjerne og bruge næringsstofferne, før de udledes til havmiljøet. Tang er også en råvare med et lavt klimaaftryk, særligt når den dyrkes på liner frem for på net.

Hvordan får vi mere tang på tallerkenen?

I dag indgår tang i menuen hos flere af Danmarks førende restauranter, hvor kokke arbejder målrettet med at udforske og fremhæve tangens unikke smagsprofil. Tang passer godt ind i den nordiske gastronomiske bevægelse, hvor der er fokus på lokale, sæsonbaserede og mere bæredygtige råvarer. Som en ressource fra havet repræsenterer tang derfor en råvare, der både kan bidrage med nye smagsnuancer og understøtte ønsket om en mere stedbundet og bæredygtig madkultur. At integrere tang i restauranter er en god strategi for at sikre gode oplevelser blandt de forbrugere, som er mest åbne for nye ideer – og kan fortælle om deres oplevelse til deres omgangskreds.

Et bredere forbrug kan fremmes ved at sørge for, at flere forbrugere i stigende grad møder tang, da det normaliserer tang som en fødevarer. I forbrugernes møde med tang bør følgende tre elementer støttes samtidig: Muligheder, motivation og færdigheder.

Det betyder, at man skal tilbyde tang til en overkommelig pris og i forskellige typer af produkter, så der er mulighed for at få tang i et produkt, som man kan forstille sig at bruge. Det betyder også, at man skal informere om de forskellige gode grunde til at spise tang, som appellerer til forskellige behov hos forbrugere – for eksempel interesse for noget sundt, lokalt, bæredygtigt eller plantebaseret. Og endelig betyder det, at man skal gøre forbrugere i stand til selv at bruge tang i køkkenet – for eksempel, ved at man kan prøve det på en restaurant eller i smagsprøver i supermarkeder, at man møder det i kantiner eller skolekøkkener, eller at man får tang med en opskrift i sin måltidskasse.

En fremtid med tang

Tang er en alsidig råvare, som kan produceres bæredygtigt, og anvendes til mange formål, hvor den kan erstatte eller supplere

mindre bæredygtige råvarer. Tang kan spises som en grøntsag fra havet, indgå i foder til husdyr, bruges i materialer til fx tøj eller møbler, og biomolekyler af høj værdi i de forskellige tangarter har mange anvendelsesmuligheder i blandt andet fødevarerindustrien og farmasektoren. Samtidig rummer tang et markant kulinarisk og ernæringsmæssigt potentiale, som gør den relevant i helt almindelig hverdagsmad. Men tang bliver kun en bæredygtig ressource i det omfang, den rent faktisk bliver anvendt. Derfor er næste skridt at gøre tang mere synlig, mere tilgængelig og mere velkendt for forbrugerne, samt tage fat på de barrierer, som knytter sig til branchen.

Når forskere, producenter, myndigheder og detailhandel arbejder sammen om både dyrkning, regulering, produktudvikling og markedsadgang, kan tang bevæge sig fra niche til en naturlig del af danskernes madkultur. Tang har potentialet til at blive en af fremtidens grønne og sunde fødevarer – og det begynder med, at vi får den ind på tallerkenen. ■

VIDERE LÆSNING

Tang kan bidrage til grønne løsninger.
Aktuel Naturvidenskab nr. 1/2022.

Cultivation of sugar kelp as a marine measure for mitigating eutrophication.
Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy.
No 663, 2025.

Sammen om pladsen på havet.
Vand&Jord nr. 2/2024.

Rapport fra FAO: The State of World Fisheries and Aquaculture 2026.
doi.org/10.4060/cd8357en

Opskrifter:

Er du nysgerrig på opskrifter med tang og muslinger, så kan du begynde her:
Kenddithav.dk → opskrifter og Havhøst: havhøst.dk/opskrifter

DNA i havbunden under Arktis er økosystemernes historiske hukommelse

Om få årtier vil Arktis efter alt at dømme opleve somre helt uden havis for første gang i menneskehedens historie. For at forstå, hvilke konsekvenser det vil få, graver danske forskere ned i havbundens mudder, hvor flere tusind års klimahistorie ligger gemt i gammelt DNA.

■ Af Kristian Sjøgren , videnskabsjournalist. ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

■ Sofia Ribeiro står her med en cirka 5 meter lang borekerne fra den nordvest-grønlandske havbund. Her repræsenterer 5 meter sediment cirka 12.000 år.
Foto: Frederik W. Teglhøus/ Underground Channel



SOFIA RIBEIRO

Sofia Ribeiro er professor ved Glaciologi og Klimaafdelingen i De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS. Hun er også tilknyttet Globe Institutet ved Københavns Universitet. Sofia Ribeiro er uddannet fra Lissabon Universitet og Københavns Universitet, hvor hun forsvarede sin ph.d. i 2011. Derefter arbejdede hun som postdoc ved GEUS og Lund Universitet, inden hun blev forsker og senere seniorforsker ved GEUS.

Hun har altid haft en forskningsmæssig interesse i samspillet mellem klima, havmiljø og økosystemer i Arktis og søger gennem sin forskning at belyse, hvordan viden om fortidens klima- og miljøforandringer kan bidrage til at forstå og forudsige fremtidens udvikling. Hun er medlem af den danske, grønlandske og færøske komité for FN's *Tiår for havet* og er for nylig blevet optaget som medlem af Videnskabernes Selskab.

sri@geus.dk

■ ■ ■ ■ ■

Artiklen er sponsoreret af
Danmarks Frie Forskningsfond
| Natur og Univers.
Se mere på www.dff.dk

Der kommer en dag, hvor der om sommeren ligger åbent hav helt op til Nordpolen, uden så meget som en isflage i sigte. Blandt forskere er spørgsmålet efterhånden ikke længere, om det sker, men hvornår. Klimaforandringerne er ikke overraskende forklaringen. Havisen fungerer nemlig som et låg på det arktiske ocean. Den lægger sig mellem den kolde luft og det forholdsvis varme havvand som et isolerende lag, lidt ligesom låget på en termokande. Samtidig kaster den hvide overflade en stor del af solens stråler tilbage ud i rummet, så strålerne ikke har mulighed for at varme havet nedenunder op.

At havisen allerede er smeltet, er en af grundene til, at Arktis i dag varmer op tre til fire gange hurtigere end resten af kloden. Forandringerne helt oppe mod nord rækker langt ud over polaregnene og helt ned til vejret og fiskeriet ved vores egne kyster. Det arktiske og det atlantiske ocean hænger nemlig sammen via store havstrømme, der konstant flytter rundt på varme, salt og næring på hele den nordlige halvkugle. Netop der, hvor de to vandmasser mødes, er havet også aller mest produktivt, og en stor del af de fiskebestande, vi lever af i Nordatlanten, hviler på den balance. Rykker den sig, kan det i sidste ende mærkes helt ind på middagsbordet.

Men hvad sker der egentlig med dyr, planter og havstrømme, når isen trækker sig tilbage? Det er sværere at svare på, end man skulle tro. For selvom Arktis i dag bliver overvåget tæt med satellitter, bøger og målestationer, har forskere sjældent noget at holde tallene op imod. De ved, hvordan havet ser ud lige nu, men ikke hvordan det så ud, før vi mennesker for alvor begyndte at varme kloden op. Vi bevæger os med andre ord ind i ukendt territorium.

Danske forskere arbejder med at gøre dette territorium mindre ukendt, og det gør de blandt andet ved at analysere ældgammelt DNA dybt nede i havbunden. På den måde kan de se tilbage i tiden for bedre at kunne spå om fremtiden.

»I dag overvåger vi hele tiden et system, efter forandringen er sket. Vi opdager, at noget er galt, men vi ved ikke, hvordan det så ud før, eller hvad der egentlig er normalt. Derfor er vi nødt til at tage de lange briller på og gå tilbage i tiden for bedre at forstå nutiden og fremtiden,« fortæller professor Sofia Ribeiro fra Glaciologi og Klimaafdelingen i De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS. Sofia Ribeiro er også

tilknyttet Globe Institutet ved Københavns Universitet.

Havbunden er klodens største arkiv

De lange briller, som Sofia Ribeiro taler om, finder hun på bunden af havet. Hvert år drysser rester af døde alger, dyr og mineraler ned gennem vandsøjlen og lægger sig som et nyt, tyndt lag af mudder på havbunden. Fordi lagene stables pænt oven på hinanden over årene, årtierne, århundrederne og sågar årtusinderne, kan man læse dem nedefra og op som siderne i en meget lang dagbog. Med radioaktivt carbon (kulstof) kan forskerne også sætte årstal på de enkelte sider.

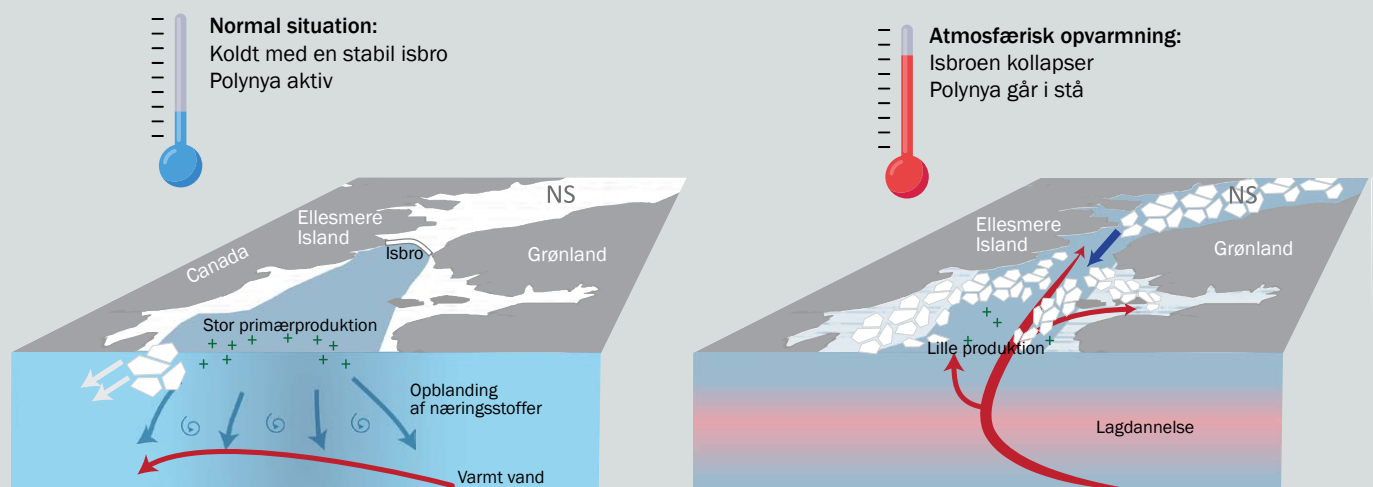
I årtier har forskere kunnet aflæse fortidens hav ved at studere mikroskopiske skaller og særlige fedtstoffer, som visse isalger efterlader sig i lagene af sediment (mudder). Men det helt store spring kom for ikke så lang tid siden, da de lærte at trække gammelt DNA ud af selve sedimentet. Når en organisme dør og synker til bunds, kan små stumper af dens arvemateriale nemlig overleve i tusinder af år, fordi havbunden er kold og iltfattig. Det betyder, at forskerne i dag kan tage prøver af sedimentet og se, hvilke dyr og planter der har levet i vandet omkring Arktis for tusinder af år siden.

»Havbunden er vores største arkiv over, hvad der er sket i fortiden. Da vi begyndte at kunne aflæse det gamle DNA i aflejringerne, var det som at finde en Rosetta-sten. Pludselig kunne vi læse hele økosystemet og se, hvilke arter der levede her for eksempel 5.000 år siden, og hvordan havet så ud,« siger Sofia Ribeiro.

Og der er langt mere at hente i sedimentet, end forskerne hidtil har nået. Hver eneste lille prøve rummer millioner af DNA-stumper fra et mylder af organismer, og forskerne er kun lige begyndt at læse dem. Det særlige ved metoden er desuden, at den også fanger de bløde og sarte organismer, som aldrig bliver til fossiler, og som derfor ellers ville være usynlige for eftertiden. Et halvt gram sediment kan på den måde rumme sporene af et helt økosystem.

Et halvt gram sediment afslører fortidens is

Et af de smukkeste eksempler på, hvad metoden kan bruges til indenfor forskningen, handler om selve havisen og dens udbredelse. Is er nemlig noget af det allersværeste at spore i geologien, for når den smelter, efterlader den sig stort set ingen spor. Derfor har forskere længe manglet en pålidelig måde at måle, hvornår og hvor meget is der lå på havet i for-



Figuren viser, hvordan Nordvandet er aktiv under normale (kolde) forhold, men går i stå, når temperaturen stiger og isbroen kolliderer. Tilpasset fra Jackson et al. 2021.

POLYNYAER

En polynya er et område med åbent vand, der er omgivet af havis. Polynyaer er økologisk vigtige, fordi det åbne vand slipper lys ned i havet og skaber store opblomstringer af planteplankton.

Planktonet danner bunden af fødekæden, og det tiltrækker fisk og derfor også større dyr som sæler, hvaler, hvalrosser og havfugle. For isbjørne og havpattedyr fungerer polynyaerne som vigtige steder at jage og trække vejret.

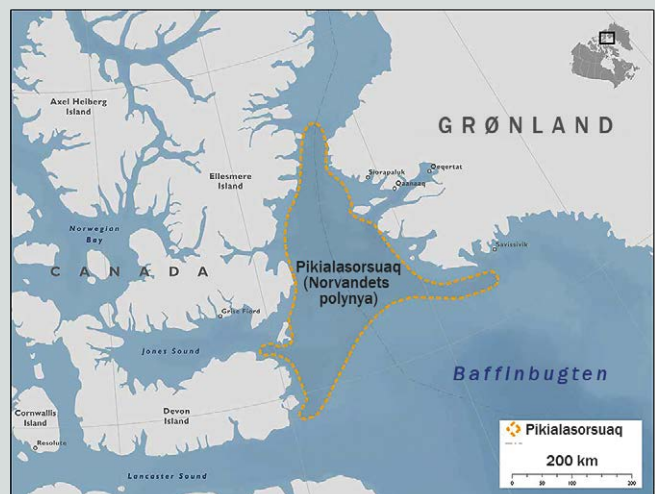
De største kendte polynyaer er:

Weddellhavspolynyaen

Weddellhavspolynyaen i Antarktis åbnede sig tre vintre i træk fra 1974 til 1976 midt ude i havisen i det sydlige ocean. På sit højeste dækkede den omkring 250.000 km² og regnes for den største kendte polynya i verden. Den dannes på åbent hav over det under-søiske plateau Maud Rise, hvor varmt vand fra dybet stiger op og holder isen væk. Da den kom igen i 2017, var den langt mindre, blot omkring 50.000 km².

Rosshavspolynyaen

Rosshavspolynyaen er den største kystpolynya i Antarktis og ligger i det vestlige og centrale Rosshav øst for Ross Island ved Ross-iskanten. Polynyaen har et gennemsnitligt areal på omkring 27.000 km², men kan vokse til op mod 50.000 km², når forholdene er gunstige. Den åbner sig hvert år sidst i november, når faldvinde fra indlandsisen presser havisen væk fra kysten, og når sin største udstrækning i januar.



Nordvandet

Nordvandet i den nordlige Baffinbugt mellem Grønland og Canada er den største og mest produktive polynya på den nordlige halvkugle. Den holdes åben af en bro af is, der hver vinter bygger sig op tværs over Nares Strædet og forhindrer pakisen i at presse ned i området, mens vind og havstrømme samtidig skubber den nydannede is væk. Mere end 80 procent af verdens søkonger yngler ved Nordvandet, og området er også afgørende for hvalros, narhval og isbjørn. Samtidig har polynyaen i årtusinder forsynet nogle af verdens nordligste mennesker med mad. ■

tiden, og om der har været perioder uden is, sådan som det vil være i den fremtid, vi ser ind i.

Løsningen blev en lillebitte alge ved navn *Polarella glacialis*. Den lever kun de steder, hvor der dannes ny havis hver vinter, og hvor isen smelter væk igen om sommeren. Ligger isen for tykt og permanent, kommer der ikke lys nok ned til algen, men er havet til gengæld helt åbent, mangler den sin is. *Polarella glacialis* trives udelukkende i det smalle vindue midt imellem, og netop derfor er den så præcis en målestok.

Sammen med sin gruppe af forskerkolleger har Sofia Ribeiro målt mængden af algens DNA i muddret og fundet det i 45 ud af 48 prøver fra havbunden rundt om Grønland. I en lang boreprøve fra Baffinbugten, der rækker 12.000 år tilbage, følger DNA-signalet smukt, hvordan isen er kommet og gået gennem årtusinderne. På den måde kan forskere med målinger af *Polarella glacialis* sige, om der har været havis i Arktis om sommeren i fortiden, ligesom de med undersøgelser af andet DNA i sedimentlagene kan afgøre, hvad tilstedeværelsen eller manglen på havis har haft af betydning for resten af økosystemet. En ekstra gevinst er, at algen lever ved begge poler, så den samme metode kan bruges både i Arktis og Antarktis.

Da Grønland blev affolket, kollapsede et helt økosystem

Nogle af de mest dramatiske og relevante historier i muddret handler dog ikke om alger, men om mennesker. Mellem Grønland og Canada ligger Nordvandet, der er en kæmpe plet åbent hav, som bliver holdt isfri hele vinteren, mens pakisen ligger tæt rundt om. Det er det største og mest produktive område af sin slags på den nordlige halvkugle, og på grønlandsk bærer det det smukke navn Pikialasorsuaq, "det store opstrømningssted".

Mere end 80 procent af verdens søkonger, en lille buttet polarmåge, yngler ved Nordvandet, og tilsammen er over 60 millioner fugle afhængige af de fedtrige vandlopper, som det åbne vand myldrer med. Fuglenes efterladenskaber gøder til gengæld kysterne, så de står som grønne oaser i et ellers goldt landskab, og gennem årtusinder har stedet været selve livsgrundlaget for nogle af verdens nordligste mennesker.

Da Sofia Ribeiro og en stor international forskergruppe gravede sig ned i fortiden ved at se på sedimentlagene, viste der sig et tankevækkende mønster. For omkring 4.400 år siden lå der et stabilt og frodigt Nordvand, præcis på det tidspunkt, hvor de første mennesker og de første store fuglekolonier indfandt sig på Nordgrønland. Senere, for mellem 2200 og 1200 år siden, blev området ustabil, produktiviteten faldt, og livet svandt langsomt ind.

Denne ustabile periode faldt påfaldende tæt sammen med, at menneskene forlod Grønland og lod landet ligge næsten mennesketomt i omkring tusind år. Først for cirka 800 år siden stabiliserede Nordvandet sig igen, og næsten samtidig ankom Thulekulturen, som er de nuværende grønlanderes direkte forfædre. Et økosystem i forandring kan altså meget vel have været med til at affolke et helt land, og det er en tænkepause værd, nu hvor isen igen er ustabil.



Algen *Polarella glacialis* set i mikroskop. Den måler cirka 0,015 mm.

GAMMELT DNA – ET NYT VÆRKTØJ TIL STUDIER AF HAVBUNDEN

Når forskere studerer havbundens "arkiv" af lag afsat i fortiden, har de traditionelt tolket klimaudvikling og økosystemer ud fra mikrofossiler og særlige fedtstoffer, som visse alger efterlader sig, når de dør. De seneste år er et nyt værktøj føjet til værktøjskassen, nemlig studier af gammelt DNA, altså arvemateriale, der har overlevet i muddret, fordi der er koldt og fattigt på oxygen.

DNA-stumperne kan enten aflæses ved at sekventere dem, så man kan bestemme, hvilke arter de stammer fra, eller tælles meget præcist med en teknik kaldet dråbe-digital PCR, hvor man måler, hvor mange kopier af et bestemt gen, der findes i prøven. På den måde kan forskerne ikke blot se, hvilke arter der var til stede, men også få et mål for populationsstørrelsen.

Den store fordel er, at DNA også finder organismer, der aldrig bliver til fossiler. Faktisk kan man genskabe et helt økosystems artssammensætning på et givet tidspunkt i fortiden ud fra blot et halvt gram mudder.

DNA fra algen *Polarella glacialis* er særligt velegnet til at fortælle om de klimatiske forhold i fortiden, fordi algen kun lever, hvor der dannes sæsonbestemt havis. Da algen lever ved begge poler, er den blevet den første målestok for havis, der virker både i Arktis og Antarktis. Den slags metoder gør det muligt at sætte præcise tal på fortidens klima- og økosystemer på en helt ny måde. ■



Billedet viser en borekerne fra havbunden, hvor der er blevet udtaget prøver til analyser. Hvert lag i borekernen repræsenterer et øjeblikbillede af fortiden, der venter på at blive afsløret. Foto: Anna B. Kvorning.



Når forskerne skal udtage prøver fra borekernen til analyser af gammelt DNA, foregår det i et særligt rent laboratorium og iført beskyttelsesdragt. Det er for at undgå at forurene prøverne med nutidigt DNA. Foto: Heike H. Zimmermann.



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af **Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.**

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Forperson for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er lektor ved DTU, Kirstine Berg-Sørensen. Se mere på www.dff.dk

»Det paradoksale er, at det her åbne, livgivende område eksisterer, fordi der dannes is. Forsvinder vinterens isbro, forsvinder Nordvandet, som vi kender det, og så kommer fødegrundlaget for millioner af fugle, pattedyr og for de mennesker, der lever af dem, også til at ændres markant,« siger Sofia Ribeiro.

Det omtalte studie var med til at få Nordvandet skrevet ind i den seneste store FN-klimarapport som et særligt klimafølsomt område, og Canada og Grønland arbejder nu på at gøre det til et beskyttet havområde.

Hvaler dukker op i muddret før i knoglerne

Havpattedyr som hvaler og sæler er notorisk svære at studere i fortiden. De fleste af dem lever og dør til havs og synker til bunds, så de optræder næsten ikke i de fossiler, forskere ellers bruger til at kortlægge fortidens dyreliv. Men deres DNA ender i sedimentet ligesom algerne, og det har åbnet en helt ny dør ind til fortiden.

I fire boreprøver fra havet rundt om Nordgrønland har ph.d.-studerende Lennart Schreiber vejledt af Sofia Ribeiro og hendes kollega fra Globe Institutet, Eline Lorenzen, fulgt hvaler og sæler 12.000 år tilbage i tiden. For flere arter dukker DNA-sporet op flere tusind år tidligere, end de ældste knoglefund overhovedet antyder. De allertidligste spor stammer fra ringsælen, der dukkede op for omkring 11.600 år siden, altså lige da indlandsisen slap sit tag i havet ved istidens slutning, og senere fulgte arter som klapmys, grønlandssæl og hvidhval.

I den varme periode for mellem 10.000 og 6.000 år siden rykkede arter, der normalt hører til i lunere vande, langt mod nord. Et af de mest slående eksempler er finhvalen, som blev sporet helt oppe omkring 75 grader nordlig bredde for 7.800 år siden, altså længere mod nord end nogen kender den fra i dag. Da forskerne regnede på det, var det netop temperaturen og mængden af alger i og under isen, der afgjorde, hvilke dyr der kunne være der.

»Den varme periode for 8.000 år siden er noget af det tætteste, vi kommer på et kig ind i en varmere fremtid. Dengang rykkede arter, vi normalt forbinder med varmere vande, langt mod nord, og det er præcis den slags omrokering, vi kan vente os igen. Det samme gælder også arter, der kun kan leve i de allerkoldeste egne. De bliver presset

længere og længere mod nord, indtil de ikke kan komme længere,« siger Sofia Ribeiro.

En fortid uden sidestykke i nutiden

Netop den varme periode bliver ofte trukket frem som en trøst, når snakken falder på klimaforandringerne. Vi har jo prøvet at have det varmere før, lyder ræsonnementet, så det går nok. Men da Sofia Ribeiros gruppe undersøgte Godthåbsfjorden ved Nuuk, den største fjord i Sydvestgrønland, fik den beroligende fortælling en alvorlig revne.

For mellem 7.000 og 3.000 år siden, da indlandsisen var skrumpet ind til sit mindste og lå bag sin nuværende kant, strømmede der varmt vand af atlantisk oprindelse ind i fjorden på en måde, vi ikke har set i nyere tid. Forskerne kalder det ligefrem en tilstand uden sidestykke i den moderne verden. Den behagelige, genkendelige varme fortid var altså slet ikke så genkendelig endda, og netop varmt atlantisk vand, der presser sig nordpå, er noget af det, forskerne holder allerskarpest øje med i dag, fordi det kan ændre de havstrømme, som er med til at skabe klimaet i Europa og resten af den nordlige halvkugle.

Hvad varmen gør ved livet i havet, afhænger i øvrigt af, hvor isen smelter. Gletsjere, der ender ude i havet, smelter nedefra og sender næringsrigt vand op mod overfladen, hvilket faktisk er gode nyheder for de mikroskopiske alger, der udgør bunden af hele fødekæden. Men trækker gletsjerne sig op på land, breder smeltevandet sig i stedet som et ferskt låg hen over havet og slæber samtidig sediment med, der skygger for lyset. Og det er desværre den vej, udviklingen går.

At det ikke er en fjern bekymring, kan måles allerede nu. Mængden af ferskvand, der løber fra Grønland ud i havet, er ifølge forskerne steget med 21 procent på bare et årti. Og uanset hvor meget vi skærer ned på udledningerne, ventes indlandsisen at miste flere procent af sin samlede masse alene i løbet af dette århundrede.

»Vi kigger på fortiden for at forstå, hvordan naturen reagerer og tilpasser sig over lange perioder. Men vi er på vej ud i ukendt land. I virkeligheden laver vi et eksperiment med hele jordsystemet, og konsekvenserne kommer til at vare ved i hundredvis, måske tusindvis af år,« siger Sofia Ribeiro.

For at finde en tid, der bare nogenlunde minder om den varme, vi nu styrer imod,

må forskerne helt tilbage til den seneste mellemistid for omkring 125.000 år siden, og skal man finde tilsvarende mængder CO₂ i atmosfæren, skal man millioner af år tilbage. Og selvom Arktis altså har været isfrit om sommeren før, ligger det så langt tilbage, at der slet ingen mennesker var til at opleve det. Sidste gang var for 8.000 til 6.000 år siden, før der overhovedet fandtes samfund i det høje nord, og derfor er det også så svært at sige, hvad et isfrit Arktis vil betyde for os.

»Sidste gang der ikke var sommerhavis i Arktis, var der slet ingen mennesker i Grønland, så vi ved reelt ikke, hvad det vil betyde for det lokale samfund. Jeg tror ikke, en dommedagsstemning hjælper nogen, men det her er nyt, og det er en forandring, vi ikke bare kan stoppe. Det er som et tog i fart, og selv hvis vi prøver at bremse, kører det et godt stykke endnu. Derfor er vi nødt til at forstå, hvor det er på vej hen,« siger Sofia Ribeiro. ■

VIDERE LÆSNING

Kvorning, A.B., Heikkilä, M., Pearce, C. et al. A Holocene fjord record from Greenland reveals exceptional Atlantic water influence during minimum ice-sheet extent. *Commun Earth Environ* 6, 326 (2025).

Schreiber, L., Ribeiro, S., Jackson, R. et al. Holocene shifts in marine mammal distributions around Northern Greenland revealed by sedimentary ancient DNA. *Nature Commun* 16, 4543 (2025).

Harðardóttir, S., Haile, J.S., Ray, J.L. et al. Millennial-scale variations in Arctic sea ice are recorded in sedimentary ancient DNA of the microalga *Polarella glacialis*. *Commun Earth Environ* 5, 25 (2024).

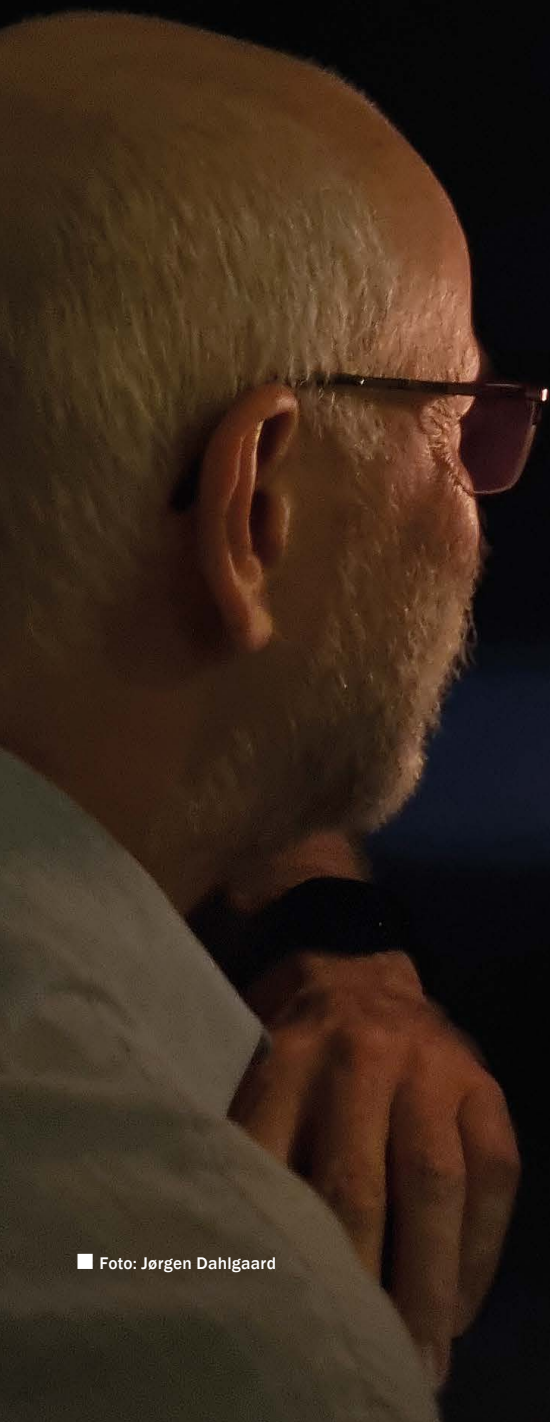
Ribeiro, S., Limoges, A., Massé, G. et al. Vulnerability of the North Water ecosystem to climate change. *Nature Commun* 12, 4475 (2021).

Candela

– lyset der er lysets målestok

Candela, som er SI-enheden for lysintensitet, er en underlig basisenhed. Den kan nemlig udtrykkes ved hjælp af andre SI-enheder, den har en meget snæver og kryptisk definition, og så er det den eneste SI-enhed, som tager udgangspunkt i menneskets sanser.

■ Af Hans Buhl



■ Foto: Jørgen Dahlgaard

»Betegnelsen candela stammer fra såkaldte standardlys, da det er det latinske ord for kæerte eller "stearinlys".«

De fleste har fornemmet, at der er mere lys på en solskinsdag end på en gråvejrsdag. Men de færreste har nok tænkt på, at sollyset kan være op til 1000 gange stærkere end lyset i gråvejr. Det siger noget om, at øjet er ret dårligt til at vurdere lysstyrker.

Denne mangel er en konsekvens af, at øjet har et helt ekstremt stort "måleområde", blandt andet takket være pupillens evne til at lukke mere eller mindre lys ind i øjet. Forholdet i følsomhed fra det lyseste man kan se til det svageste et mørketilvænnet øje kan ænse, er over 1.000.000. Det svarer til, at vi ubesværet brugte den samme målestok til at måle længder på både millimeter og kilometer.

Selvom det menneskelige øje er en dårlig *absolut lysmåler*, er det fremragende til at *sammenligne lysstyrker*. Det udnyttede man allerede i oldtiden til at angive, hvor klart en stjerne lyser. Den græske astronom Hipparchos fandt nemlig på at inddele alle synlige stjerner i seks størrelsesklasser, hvor de klareste stjerner var af første klasse, og de svageste, som kunne ses med det blotte øje, var af sjette klasse. Man kunne nu anbringe en stjerne i den rigtige størrelsesklasse ved at sammenligne lyset fra den med lyset fra en stjerne med kendt lysstyrke. Dette system bruges stadig, om end i stærkt moderniseret og kvantificeret udgave.

Standardlys

I løbet af 1700-tallet lærte man at "måle" en lyskildes lysstyrke ved at sammenligne den med en fast referencelyskilde. En af de første til på denne måde at udnytte øjets evne til at vurdere, om to objekter har samme lysstyrke, var den franske astronom m.v. Pierre Bouguer. Han fandt i 1720'erne på at oplyse to papirskærme med forskellige lyskilder og justere deres afstande til skærmene, indtil disse forekom lige oplyste. Takket være afstandskvadratloven kunne lysmålingen derved omsættes til en simpel afstandsmå-

ling. Ved på denne måde at sammenligne både Månens og Solens lys med et stearinlys lykkedes det ham at vise, at Solens lys var cirka 300.000 gange mere intenst end Månens.

Forskellige, stadig mere avancerede udgaver af denne sammenligningsmetode, blev benyttet til lysmåling i de følgende to århundreder, indtil fotoelektriske detektorer kom frem og muliggjorde objektive målinger.

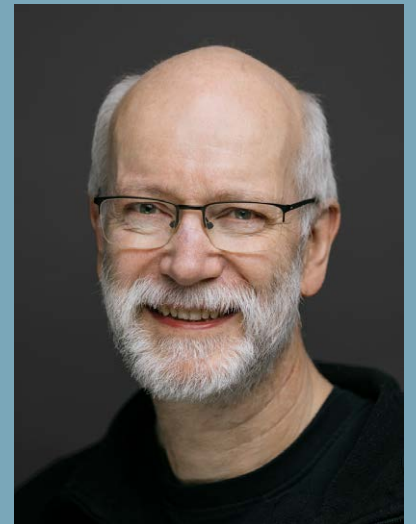
Indtil omkring 1800 var det stort set kun astronomer, der havde brug for at måle lysstyrker, men med fremkomsten af gaslys i begyndelsen af 1800-tallet og ikke mindst det elektriske lys i slutningen af århundredet voksede behovet for at kunne måle lysstyrken af forskellige lyskilder, så man kunne specificere, hvor stærkt de hver især lyste.

Derfor blev der i flere lande defineret standarder for lysstyrke, som typisk var baseret på lysstyrken af flammen fra et såkaldt "standardlys" med en helt bestemt udformning. Den bedst kendte af disse var den engelske standard for lysstyrke: 1 candlepower var lysstyrken fra flammen på et såkaldt spermacet-lys på 2 cm i diameter, der brændte med en hastighed på 7,8 gram i timen. Et spermacet-lys var et "stearinlys" lavet af ren spermacetolie, der stammer fra næsen på kaskelothvaler. Betegnelsen candela stammer fra disse standardlys, da det er det latinske ord for kæerte eller "stearinlys".

I Tyskland, Østrig og Skandinavien brugte man i stedet en såkaldt Hefner-lampe som standardlyskilde. Det var en særlig olielampe, som brændte stoffet amylacetat. Den var specificeret til at lyse med 1 Hefnerkerze, når en væge med en diameter på 8 mm gav en flammehøjde på 40 mm. En Hefnerkerze var cirka 10 % svagere end den engelske candlepower.

Lyset fra glødende platin

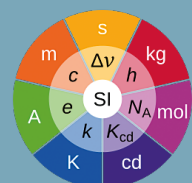
Ud over at det var noget rod med forskellige standarder – der var over ti – var det svært



HANS BUHL

Hans Buhl er samlingsleder og museumsinspektør for videnskabs-historie på Steno Museet/Science Museerne ved Aarhus Universitet. Han er blandt andet optaget af samspillet mellem den videnskabelige og den teknologiske udvikling.

hans.buhl@sm.au.dk



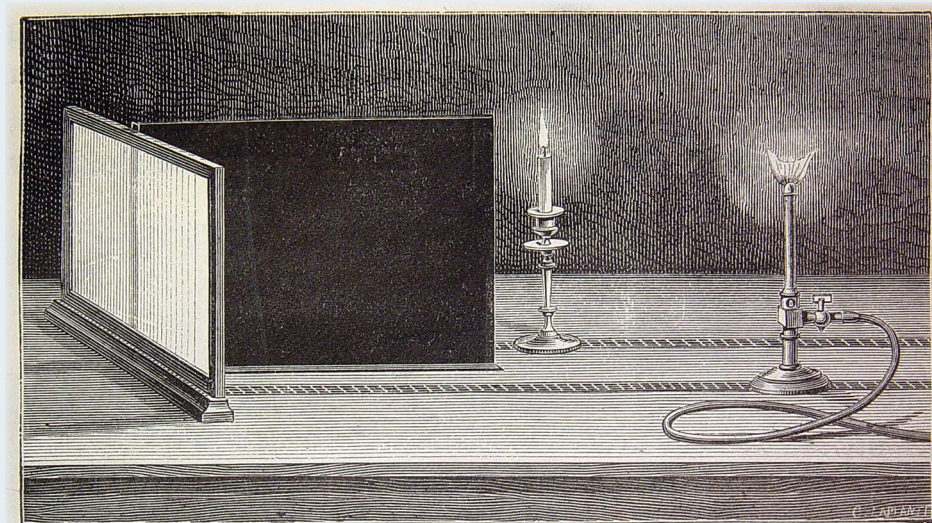
at gøre lysstyrken fra de forskellige standardlys og -lamper stabil nok. For at omgå dette problem udnyttede den franske fysiker og opfinder Jules Violle i starten af 1880'erne det fænomen, at lysstyrken af glødende metal primært afhænger af dets temperatur. Han foreslog således en standard baseret på styrken af det lys, der udsendes af 1 cm^2 platin ved dets smeltepunkt på 1768°C . Platin blev valgt på grund af sit høje smeltepunkt, og fordi det ikke oxiderer. Den resulterende lysstyrkeenhed blev kaldt violle og var cirka 60 gange større end den engelske candlepower.

Ideen var strålende, men det var vanskeligere end forventet at realisere en standard baseret på Violles forslag. Derfor fortsatte man i praksis med at bruge forskellige standardlys, både flammebaserede og efterhånden også specielle glødelamper, som reference ved lysmåling langt op i 1900-tallet.

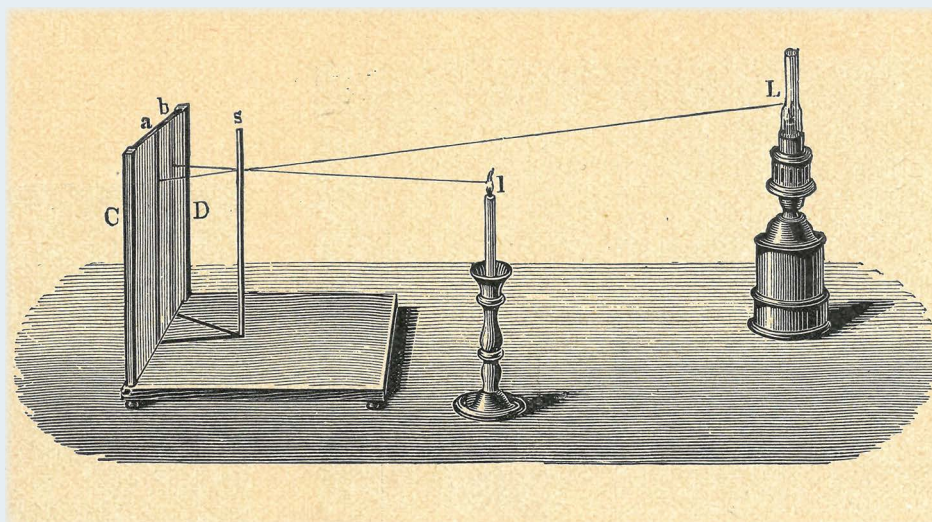
En fælles standard: fra candle til candela

Det første vellykkede forsøg på en harmonisering af området skete i 1909, hvor en række lande blev enige om at definere en "international candle", der svarede til den engelske candlepower. Men som nævnt blev den stadig realiseret ved hjælp af forskellige – mere eller mindre præcise – standardlyskilder.

Omkring 2. Verdenskrig var man blevet så dygtige til at realisere platinmetoden, at Den Internationale Komité for Mål og Vægt (ICPM) i 1946 foreslog, at den internationale candle blev erstattet af en "new candle", som var defineret ved, at den var $1/60$ af lysstyrken fra 1 cm^2 glødende platin ved dets størknings-temperatur. Da Generalkonferencen for Mål og Vægt (CGPM) i 1948 ratificerede denne indstilling, indførte man samtidig navnet candela for enheden. I 1954 blev den gjort til en af basisenhederne i SI-systemet.



Bouguers fotometer fra midten af 1700-tallet til sammenligning af lysstyrker. Det fungerer ved, at to lyskilder oplyser hver sin skærm. Deres afstande til skærmene ændres, indtil begge skærme er lige kraftigt oplyst. Herefter kan forholdet mellem lysstyrkerne findes ved hjælp af afstandskvadratloven.



I slutningen af 1700-tallet fandt den britiske statsmand og fysiker Grev Rumford på en forbedret udgave af Bouguers fotometer. I stedet for at sammenligne de oplyste flader, som kunne trætte øjnene og føre til fejlvurderinger, fandt han på at lade lyskilderne kaste en skygge. Skyggens "dybde" eller kontrast, afhænger nemlig af lysstyrken. Lyskildernes afstand til skyggegiveren blev så justeret, indtil deres skygger var ens.



Et spermacetlys som findes i den naturhistoriske samling på Ribe Katedralskole. Bemærk etikettens sammenligning af forskellige måleenheder for lysstyrke. Foto: Jørgen Baungaard Hansen.



I Steno Museets samling findes et såkaldt Zöllner-fotometer, som blev opfundet af den tyske astrofysiker Johann Karl Friedrich Zöllner omkring 1860.

Instrumentet er beregnet til at blive monteret på en kikkert, hvor det kan bruges til at måle en stjernes tilsyneladende lysstyrke, dvs. lysstyrken set fra Jorden. Det kan blandt andet benyttes til afstandsbestemmelse af stjerner.

Zöllner-fotometrets optik er indrettet således, at man i synsfeltet kan se både den observerede stjerne og en "kunstig" stjerne, som dannes af en lyskilde i instrumentet. Derved har astronomen kunnet sammenligne deres lysstyrker. Lysstyrken af den kunstige stjerne kunne reguleres ved at sende lyset fra lyskilden gennem to polarisationsfiltre, hvoraf det ene kunne roteres. Oprindeligt har referencelyskilden været en gasflamme, men den er senere ændret til en glødelampe.

Fotos: Carsten R. Kjaer / Jørgen Dahlgaard.

På sin vis er candela en overflødig enhed, fordi man indenfor fysikken generelt måler strålingsintensitet i effekt per areal (W/m^2) eller effekt per rumvinkel (W/sr). Det gælder uanset, om der er tale om radiobølger, varmestråling, lys, røntgen eller strålingen fra radioaktive stoffer.

Når man alligevel har valgt at bibeholde enheden candela, skyldes det, at det i praksis er nødvendigt at have et mål for, hvordan det menneskelige øje opfatter lysstyrke. Vi lever i en tid, hvor vi er omgivet af forskellige typer lyskilder og skærme, og derfor er det vigtigt at kunne måle, hvor meget vi oplever, at de lyser.

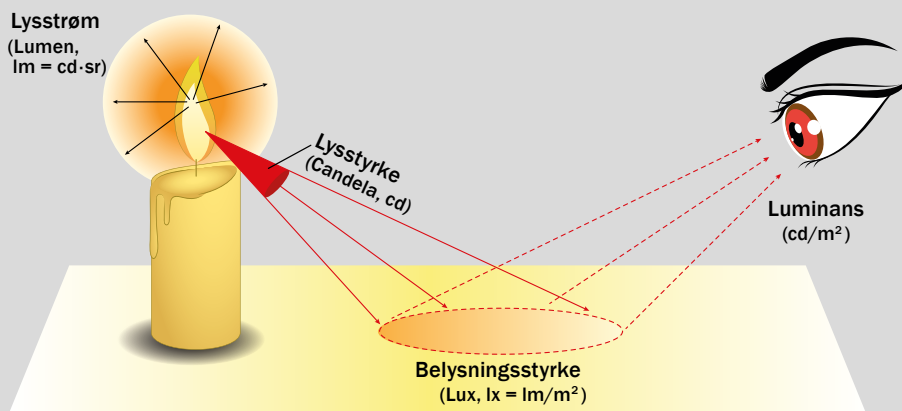
Den menneskelige SI-enhed

Dette antropocentriske aspekt kommer tydeligt frem gennem den nye definition af candela, som blev indført i 1979: »Candela er lysstyrken i en given retning af en kilde, der udsender monokromatisk stråling med frekvensen 540×10^{12} Hz, og som har en strålingsintensitet i den retning på $1/683$ watt per steradian.«

Lys med den nævnte frekvens har en bølglængde på 555 nm svarende til lysegrønt lys, hvilket lige præcis er den farve, hvor det menneskelige øje har sin største følsomhed. Candela måler altså ikke længere den samlede lysstyrke, men lysstyrken af en ganske bestemt farve. Skal der måles ved andre farver, tages der højde for øjets lavere følsomhed ved disse bølglængder.

Det betyder, at selv en kraftig ultraviolet lyskilde vil have en lysstyrke på 0 målt i candela, fordi det menneskelige øje ikke kan se ultraviolet lys. Hvis man derimod forestiller sig, at andre dyrearter – for eksempel bier, der kan se ultraviolet lys, eller slanger, der kan registrere infrarød stråling – skulle lave et belysningsystem, ville deres udgave af en candela se fuldstændig anderledes ud end vores. Dette understreger det atypiske ved enheden candela. Alle andre SI-enheder er således helt uafhængige af biologiske forhold.

Den ”skæve” faktor $1/683$ i ovenstående definition er medtaget for at sikre, at den nye definition præcist svarer til den gamle definition. Endelig er 1 steradian den rumvinkel, der udgør præcis $1/4\pi$ af den fulde rumvinkel rundt om lyskilden.



LYS KAN MÅLES PÅ MANGE MÅDER

En vanskelighed ved lysmåling er, at lys kan karakteriseres på forskellige måder, alt efter hvilke aspekter man vil fremhæve.

Lysstyrke er defineret som en lyskildes intensitet i en bestemt retning, således som øjet opfatter den. Lysstyrke måles i *candela* (cd).

Lysstrøm er derimod et mål for den samlede mængde synligt lys, som en lyskilde udsender. Lysstrøm måles i *lumen* (lm). Denne størrelse er ofte opgivet på LED-pærer for at kunne sammenligne, hvor meget lys de i alt udsender. Ved en retningsbestemt lyskilde (som en lomme-lygte) vil lysstyrken af lyset være højere end fra en rundspredende lyskilde med den samme lysstrøm. Det skyldes, at lyset er fokuseret i en bestemt retning.

Belysningsstyrke, også kaldet *illuminans*, er et udtryk for, hvor meget lys der rammer en given overflade, dvs. lysstrøm per

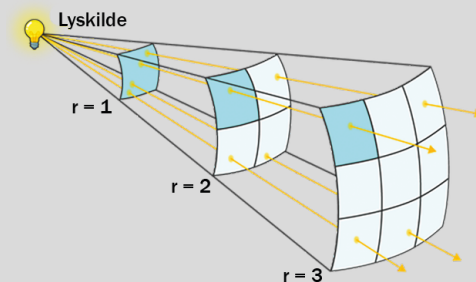
areal. Belysningsstyrke måles i *lux* (lx), der er defineret som *lumen per kvadratmeter* (lm/m^2). Belysningsstyrken er afgørende for, at for eksempel en bogside er belyst nok, til at man kan læse den.

Luminans angiver, hvor meget synligt lys, der udsendes fra en belyst flade i en given retning per areal. Størrelsen er altså et mål for, hvor lys en flade opleves. Luminans har ikke nogen selvstændig enhed, men angives i *candela per kvadratmeter* (cd/m^2).

Opsummerende kan man sige, at **lystrøm** (*lumen*) fortæller, hvor meget lys en pære i alt *udsender* i alle retninger, hvorimod **lysstyrken** (*candela*) angiver, hvor intenst lyset er i én *retning*. Altså hvor koncentreret det er. **Belysningsstyrke** (*lux*) handler om, hvor meget lys der *rammer* en overflade, mens **luminans** er et mål for, hvor oplyst en overflade *ser ud*.

Afstandskvadratloven

Hvis en lyskilde stråler i alle retninger, skal lyset fra den fordeles på en tænkt kugleflade rundt om lyskilden. Jo længere væk man er fra kilden, desto større er kuglen og dermed dens overfladeareal, og desto mindre lys er der pr. arealenhed. Eftersom arealet vokser med radius i anden, falder lysstyrken med en over radius i anden. Dvs. hvis afstanden fordobles, vil lysstyrken falde til en fjerdedel.





I mange praktiske sammenhænge er det mere hensigtsmæssigt at måle illuminansen, dvs. belysningsstyrken (i lux) frem for lysstyrken (i candela). For eksempel når man på en arbejdsplads vil undersøge, om der er lys nok til at udføre de forskellige opgaver godt og sikkert. Et typisk luxmeter måler belysningsstyrken med en fotocelle, som er anbragt under en hvid, gennemsigtig kuppel, så den også måler lys fra siden korrekt. Fotocellen omdanner det indkommende lys til en lille elektrisk strøm, som af instrumentets elektronik omsættes til en belysningsværdi, der vises på skærmen.



Den nye definition af candela i 1979 gjorde det muligt at realisere enheden ved hjælp af kalibrerede optiske strålingsdetektorer. The National Institute of Standards and Technology (NIST) implementerede denne teknik i begyndelsen af 1990'erne ved hjælp af denne siliciumdiode-fotodetektor. Detektoren havde et filter, der efterlignede det menneskelige øjes følsomhed over for forskellige farver. Det var første gang, man i USA realiserede enheden candela ved hjælp af en detektor – og altså ikke var afhængig af forskellige typer lamper som standardlyskilder. Credit: NIST.

Et andet vigtigt aspekt af 1979-definitionen er, at den vender definitionen på hovedet. Før var den *kildebaseret*, idet den tog udgangspunkt i en fysisk lyskilde, for eksempel en flamme eller smeltet platin. Den nye definition er derimod *detektorbaseret*, idet den bygger på en nøjagtig måling af energien i det udsendte lys.

Candela baseret på naturkonstanter

Siden årtusindeskiftet har der været en bestræbelse på at løsrive definitionerne af de basale SI-enheder fra fysiske objekter og målinger og i stedet basere dem på definerede naturkonstanter.

Det har også været tilfældet for candela, som i 2019 fik en ny definition, der primært er rettet mod tekniske eksperter og bestemt ikke er lettere at forstå end de tidligere: »Candela ... er defineret ved at fastsætte den numeriske værdi af lysudbyttet af monokromatisk stråling med frekvensen 540×10^{12} Hz, K_{cd} , til at være 683, når den udtrykkes i enheden $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, som er lig med $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$, eller $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, hvor kilogram, meter og sekund er defineret ud fra h , c og $\Delta\nu_{Cs}$.«

Sagt på mere jævnt dansk har man defineret en konstant, K_{cd} , som kaldes den fotometriske strålingsækvivalent. Den fastlægger forholdet mellem lysstyrke og strålingseffekt og har værdien 683 lumen per watt (lm/W). Den er et udtryk for, hvor stærkt det nævnte grønne lys opleves af det menneskelige øje, når lyset har en given effekt. 1 candela er så defineret som lysstyrken af det grønne lys, når det har en effekt på $1/683$ watt per steradian (W/sr).

Meget belejligt svarer det stort set til lysstyrken af flammen på et stearinlys. Så på en måde er alt ved det gamle, selvom definitionen er blevet ret uforståelig.

Men derfor er det ikke nødvendigvis en god scorereplik at sige: »Her sidder vi så med en strålende SI-enhed foran os«, næste gang du sidder til en hyggelig fest med levende lys på bordet.

Fra flimrende flammer til fintmærkende fotometre

Takket være de stadig mere detaljerede definitioner og ikke mindst udviklingen af avancerede fotometre har lysmåling udviklet sig

fra at være subjektive sammenligninger af forskellige lyskilders styrke til at være objektive, præcise og reproducerbare målinger.

Måling af lysstyrke er dog stadig forbundet med relativ stor usikkerhed i forhold til måling af andre SI-enheder. Vi kan måle tidsrum med en nøjagtighed på en milliardtedel af en milliardtedel af et sekund, mens lysstyrke kun kan måles med en nøjagtighed på cirka en tusindtedel. Derfor arbejdes der ihærdigt på at reducere denne usikkerhed, fordi blandt andet belysningsindustrien har brug for at vide, hvordan dens designændringer omsættes til bedre lyskilder. ■

LITTERATUR

Om SI-systemet:

www.bipm.org/en/publications/si-brochure

Om realiseringen af enheden candela:

www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique

National Institute of Standards and Technology (NIST) om candela:

www.nist.gov/si-redefinition/candela

D.R. Bertenshaw, "The standardisation of light and photometry – A historical review", *Lighting Res. Technol.* 2020, 52: 816–848.

doi.org/10.1177/1477153520904755

Nathaniel R. Greene, "Shedding Light on the Candela", *Phys. Teach.* 2003, 41: 409–414.

doi.org/10.1119/1.1616481

Xiang Chen, "Visual photometry in the early 19th century: A "good" science with "wrong" measurements", i J.

Buchwald and A. Franklin (red.) *Wrong for the Right Reasons*, 2005, 161–83.

Uendelighed: En matematisk idé, vi ikke kan leve uden

Uendelighed er et begreb, som har voldt matematikerne kvaler gennem tiden. Men med udviklingen af mængdelæren fik de styr på problemerne, hvilket blandt andet udmøntede sig i den erkendelse, at nogle uendeligheder er større end andre.

Af Asger Törnquist



ASGER TÖRNQUIST

Asger Törnquist er lektor ved Institut for Matematiske Fag, Københavns Universitet, og er formand for Dansk Matematisk Forening. Han forsker og underviser i logik og mængdelære med særlig interesse for anvendelser indenfor andre grene af matematik, for eksempel operator-algebra og dynamiske systemer. Han interesserer sig særligt for de problemer i andre grene af matematik, som ligger ved grænsen for hvad det nuværende grundlag for matematik kan håndtere.

asgert@math.ku.dk

I perioden cirka 1872-1900 gjorde den tyske matematiker Georg Cantor en række skelsættende opdagelser om uendelighed i matematik. Cantor opdagede blandt andet, at ikke alle uendeligheder har den samme størrelse: Nogle uendeligheder er simpelthen større end andre uendeligheder!

Cantors opdagelser var så chokerende for datidens matematikere, at nogle helt afviste hans ideer. Men den indflydelsesrige matematiker David Hilbert gav sin stærkeste støtte til Cantors teori. Hilbert indså nemlig, at Cantors teori, som kaldes *mængdelære*, var matematikkens chance for at få styr på alle de problemer, som uendelighed havde voldt igennem årtusinder. I denne artikel vil jeg fortælle om, hvorfor uendelighed er så vigtigt for matematik, om uendelighedens historiske udfordringer, og om hvordan vi ser på Cantors teori i dag.

Uendelighed på Hilberts hotel

Uendelighed dukker op i matematik helt fra begyndelsen. For eksempel virker det oplagt, at der er uendeligt mange positive hele tal 1,2,3,4, ... osv., for det næste tal i rækken fås altid ved at lægge 1 til, og den proces stopper aldrig.

Uendelighed er noget spøjst noget. Forestil dig som tankeeksperiment et hotel med uendeligt mange værelser, nummereret 1,2,3,4, ... osv. Vi kalder det *Hilberts hotel*. En nat, hvor alle værelser er optaget, klager mange gæster over støj fra naboværelserne. Hvad gør den kvikke portier? Han beder alle gæsterne flytte over i værelserne med ulige numre, 1,3,5,7, ... osv., sådan at der bliver et tomt værelse mellem hvert beboet værelse, og dermed nattero. Helt konkret kan vi bede

gæsten på værelse x flytte til værelse $2x-1$, dvs. $x-1$ værelser længere hen ad gangen (se illustration).

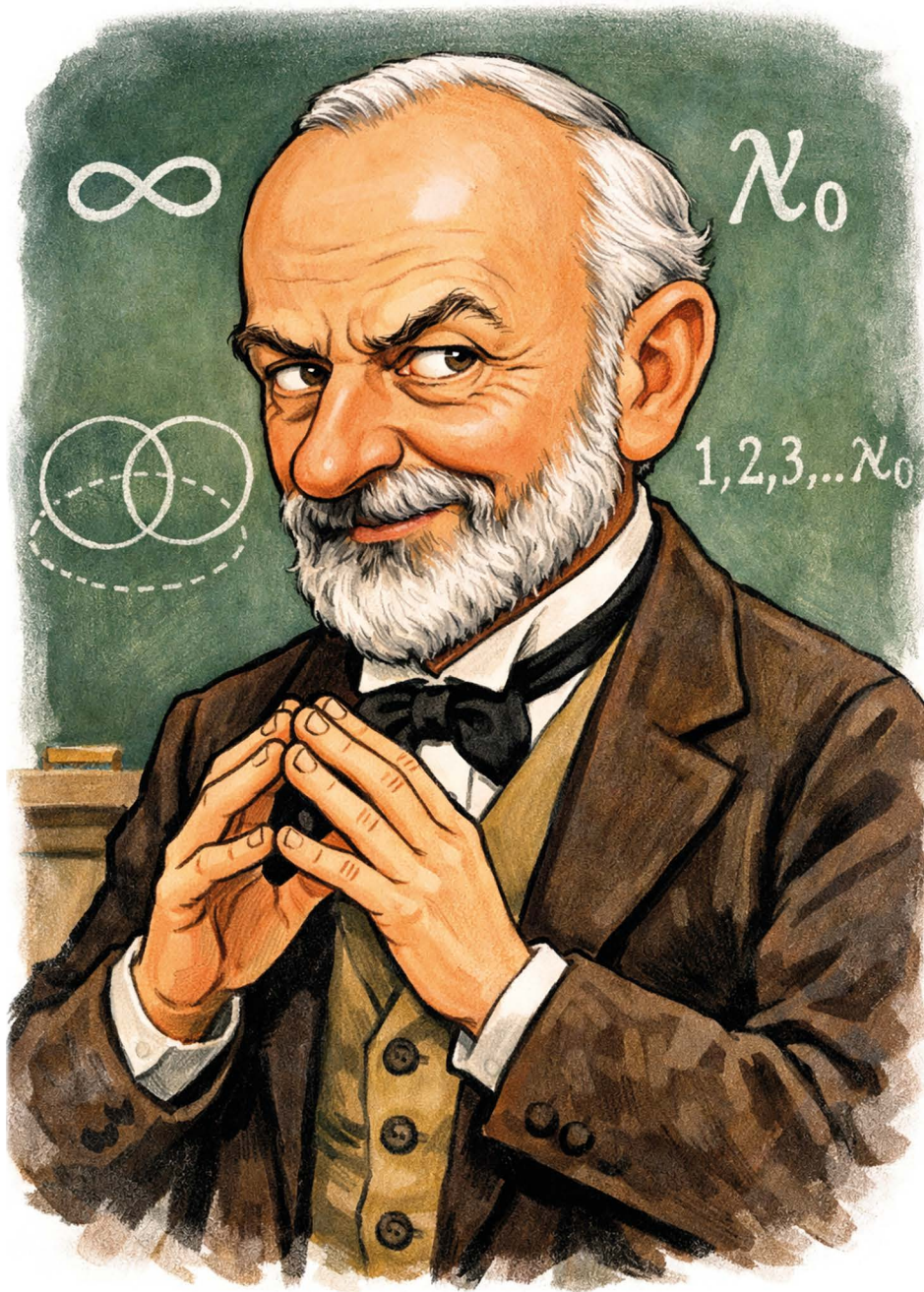
Den ville ikke gå på et endeligt hotel, for så kom der til at mangle værelser til cirka halvdelen af gæsterne. Men på et uendeligt hotel er der masser af plads!

Eksemplet illustrerer, at der i en vis forstand er præcis lige så mange *ulige* positive hele tal, som der er positive hele tal, selvom vi intuitivt synes der kun er halvt så mange. For ligesom jeg kan indse, at jeg har lige mange fingre på højre og venstre hånd ved at parre fingrene sammen en-til-en, så parrer portierens omrokering alle de positive hele tal sammen med de positive ulige tal en-til-en.

Uendelighed er vigtigt

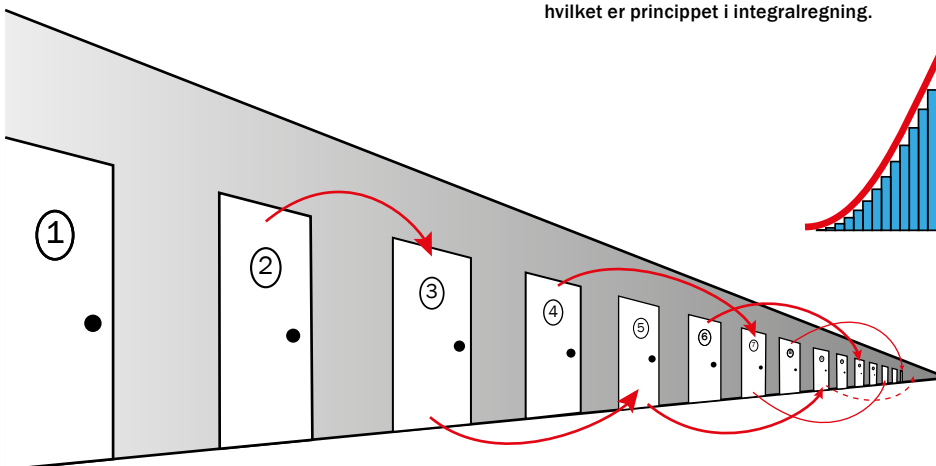
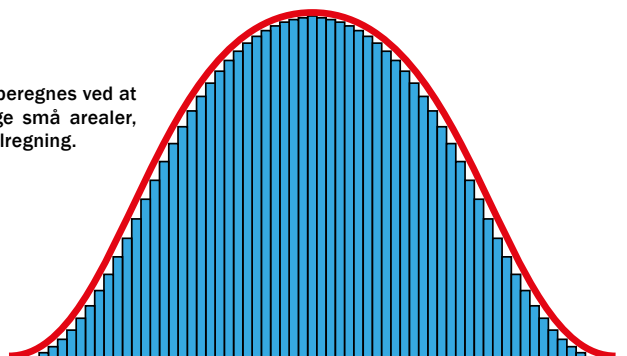
Hilberts hotel er et sjovt tankeeksperiment, men man kan spørge om matematisk uendelighed egentlig er vigtigt? Uendelighed er vigtigt, blandt andet fordi matematik baseret på uendelighed bruges af fysikere, ingeniører, klimaforskere, økonomer, statistikere, og mange andre til ting, der er kritiske for mennesker og samfund. Derfor skal matematik baseret på uendelighed være lige så solid og fejlfri, som al anden matematik.

Når man lærer differential- og integralregning i gymnasiet, møder man her matematik, hvor uendelighed for alvor bliver vigtigt. Her forklares udregningen af arealet under en graf ved integralregning med, at området skæres ud i uendelig mange uendelig små rektangler, som integralet summerer. Integralet baserer sig altså på en ret avanceret anvendelse af uendelighed, og man må spørge sig



Cantor parrer sine fingre en-til-en og illustrerer dermed, at der i en vis forstand er lige så mange *ulige* positive hele tal som positive hele tal. Figuren er lavet med ChatGPT.

Arealet under en kurve kan beregnes ved at opdele det i uendelig mange små arealer, hvilket er princippet i integralregning.



På Hilberts hotel skal alle flytte hen på værelse nr. $2x-1$, hvor x er det værelsesnummer, man starter i.

selv: Giver det virkelig mening at lægge "uendeligt mange, uendeligt små" arealer sammen? Er det ikke en tvivlsom idé?

Differential- og integralregning blev udviklet parallelt og uafhængigt af Isaac Newton og Gottfried Wilhelm Leibniz i anden halvdel af 1600-tallet. Det gjorde de i høj grad med øje for at løse problemer i fysik og astronomi. Selvom man kan tvivle på, at ideen bag giver mening, så stemmer resultaterne, man får, med den fysiske virkelighed.

Er det ikke godt nok? Ikke for matematik. Matematik er et fag grundlagt på stringente beviser, baseret på logisk argumentation. Det er det, der giver matematisk viden en særstatus i vores samfund. Det var i antikkens Grækenland, for cirka 2500 år siden, at matematik baseret på beviser blev opfundet. De gamle grækere udviste en særlig forsigtighed overfor uendelighed, for man vidste, at uforsigtighed førte til paradokser. Det var den forsigtighed, som Newton og Leibniz smed overbords.

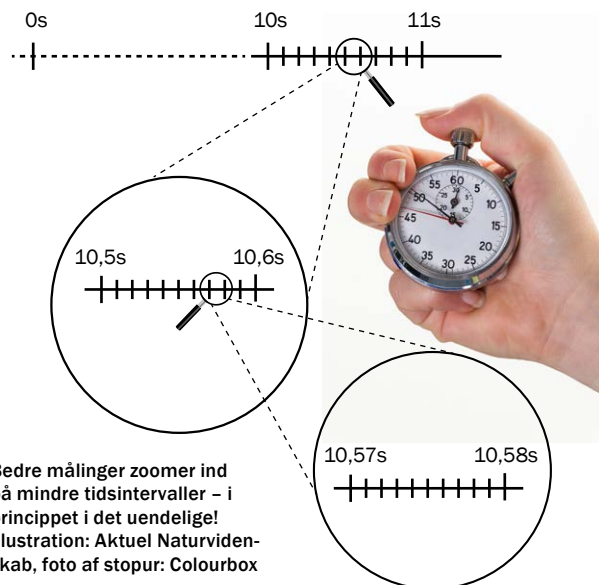
Et kontinuum af udfordringer

Stort set alle seriøse problemer med uendelighed har sin oprindelse i, hvordan kontinuert bevægelse beskrives matematisk. Det havde filosofen Zenon på komisk vis allerede illustreret for over 2400 år siden med sine paradokser, for eksempel *Achilleus og skildpadden* (se faktaboks).

I vores dagligdag dukker kontinuitet typisk op, hvor vi bruger komma-tal. Hvis en sprinter løber 100-meterløb, hvor lang tid tager det så, før hun kommer i mål? Hvis vi kun har et stopur, der måler sekunder, kan vi kun måle hendes tid med 1 sekunds nøjagtighed. For eksempel at hendes tid t er mindst 10 sekunder, og under 11 sekunder, dvs. $10s \leq t < 11s$. Vi får altså et *tidsinterval* af længde 1 sekund, lad os kalde det I_0 . Med et ur, der måler tiendedele sekunder får vi et mere nøjagtigt tidsinterval I_1 , måske $10,6s \leq t < 10,7s$, dvs. en nøjagtighed på 1 decimal. Med hundrededele? Et tidsinterval I_2 f.eks. $10,68s \leq t < 10,69s$, og altså 2 decimalers nøjagtighed.

Vi har altså den idé, at der mellem 0 og 11 sekunder findes et *uafbrudt kontinuum* af tid, som i øvrigt også strækker sig før og efter løberens løb. Det kræver muligvis uendeligt mange decimaler at beskrive løberens virkelige tid helt præcist, og forskellige stopure giver os kun tidsintervaller, som er *approximationer* til den virkelige tid.

Den franske matematiker Cauchy opbyggede i 1800-tallet en matematisk teori om det uafbrudte kontinuum på baggrund af idéen, at enhver måleproces $I_0, I_1, I_2, I_3, \dots$, hvor måleintervallerne hurtigt bli-



ZENONS PARADOKSER

For knap 2500 år siden opstillede filosofen Zenon tre paradokser om bevægelse:

Bevægelse er umulig. For at bevæge sig fra A til B skal man først bevæge sig halvvejen, og dernæst halvvejen af det resterende stykke, osv., i det uendelige.

Achilleus og skildpadden. Hurtigløberen Achilleus skal løbe om kap med en skildpadden. Skildpadden gives et forspring. Imens Achilleus indhenter forspringet, har skildpadden bevæget sig yderligere et stykke frem og igen fået et forspring, som Achilleus skal indhente, osv. i det uendelige.

Den flyvende pil. En pil, der flyver gennem luften, er i ethvert øjeblik præcis et sted i rummet, og bevæger sig derfor ikke. Da pilen aldrig bevæger sig, er bevægelse umulig.

Hvis vi bruger Cauchys kontinuum til at beskrive bevægelse matematisk, falder alle Zenons paradokser. Dette kræver naturligvis, at vi accepterer Cauchys teori!

CANTORS DIAGONALARGUMENT

Hvis $\mathbb{R}$ og $\mathbb{N}$ havde samme størrelse, kunne de reelle tal (decimaltal) "parres" en-til-en med de positive hele tal, dvs. vi kunne finde en liste

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots$$

over alle decimaltal, hvor x_i er det decimaltal, der parres sammen med i .

Cantor beviste, at sådan en liste findes ikke. Det er nemmere at illustrere Cantors ide, hvis vi kun kigger på tal *mellem* 0 og 1. Så lad os sige, at samtlige decimaltal mellem 0 og 1 kan listes, for eksempel som det er gjort her (ignorér i første omgang det blå tal):

c :	0,4 9 6 8 3 5 8...
$x_1 :$	0,2 6 0 9 4 7 2...
$x_2 :$	0,5 7 2 9 4 8 3...
$x_3 :$	0,9 7 8 2 9 5 7...
$x_4 :$	0,8 8 8 6 2 6 4...
$x_5 :$	0,5 8 1 5 1 1 4...
$x_6 :$	0,2 2 7 7 2 3 1...
$x_7 :$	0,3 2 8 2 2 6 6...
	⋮

Listen er uendelig lang, og hvert tal på listen har uendeligt mange decimaler.

Hvad er så det blå tal c? Og hvordan kommer vi frem til c?

Det blå tal c får vi ved at "diagonalisere" listen $x_1, x_2, x_3, \dots$, ved at se på de røde tal. Bagefter indser vi, at c ikke står på listen $x_1, x_2, x_3, \dots$.

Vi vælger første decimal i c til at være forskellig fra 0 og 9, og sådan at:

- den er forskellig fra første decimal i x_1 , og
- den er ikke "nabo" til første decimal i x_1 .

Det betyder, at vi kan vælge den første decimal i c til at være 4,5,6,7 eller 8, men *ikke* 0,1,2,3 eller 9. Lad os sige, at vi vælger 4 som første decimal i c.

Anden decimal i c vælges nu sådan, at den er forskellig fra 2. decimal i x_2 og ikke er nabo til 2. decimal i x_2 . Vi kan altså vælge 0,1,2,3,4,5,9, men ikke 6,7,8. Lad os sige, vi vælger 2. decimal i c til at være 9.

Tredje decimal i c skal være forskellig fra 3. decimal i x_3 , og ikke nabo til 3. decimal i x_3 . Valgmulighederne er derfor 0,1,2,3,4,5,6. Vi vælger for eksempel 6.

Sådan fortsætter vi for evigt, og opnår til sidst det blå tal c.

Men se, tallet c står ikke på listen $x_1, x_2, x_3, \dots$! For c kan ikke være x_1 , for vores valg af 1. decimal i c sørger for, at der er et "mellemrum" mellem x_1 og c af mindst længde $1/10$. Og c kan ikke være x_2 , for vores valg af 2. decimal sørger for, at der et mellemrum mellem x_2 og c af mindst længde $1/100$. Osv. i det uendelige!

ver mindre og mindre, identificerer præcis ét (tids-)punkt i dette kontinuum. Cauchys kontinuum kalder vi i dag *de reelle tal*. Med afsæt i Cauchys arbejde fik man i løbet af 1800-tallet en matematisk stringent teori om kontinuitet, og for differential- og integralregning. Den nye teori lagde også Zenons paradokser endeligt i graven.

Cauchys teori er flot, men der er en pris: Kommatal, som løberens tid, skal nu opfattes som *resultatet* af en uendelig proces af bedre og bedre målinger. Dvs. at løberens virkelige tid er noget, vi kommer frem til, *efter* noget der er uendeligt!

Mængdelære: Uendelighedens moderne gennembrud

Det var med afsæt i Cauchys arbejde, at Georg Cantor fra omkring 1870 og frem begyndte at udvikle sin vidtgående teori om uendelighed, *mængdelæren*. Cantors teori vokser naturligt frem, hvis vi tager alvorligt, at nogle objekter i matematik er *et slutresultat af en uendelig proces*. For eksempel:

- Tallene 1,2,3,4,... opstår ved at gentage processen "læg 1 til" for evigt. Denne uendelige proces har som slutresultat et matematisk objekt, nemlig *mængden* af alle positive hele tal 1,2,3,4,..., som vi bruger symbolet $\mathbb{N}$ for.
- Ethvert reelt tal (dvs. "kommatal") er i følge Cauchy resultatet af en uendelig approximationsproces. Når *samtlig*e approximationsprocesser er færdiggjorte, så fremkommer der et slutresultat, nemlig *mængden* af alle reelle tal, som vi bruger symbolet $\mathbb{R}$ for.

Cantors fidus er altså, at det, der er opstået efter en eller mange uendelige processer, kan samles sammen til ét enkelt objekt, en *mængde*. Dette ene objekt består måske i sig selv af uendeligt mange dele. For eksem-

pel består objektet $\mathbb{N}$ af de uendeligt mange tal 1,2,3,4,...

Cantor begyndte fra omkring 1870 og frem at udvikle teorien om mængder, altså *mængdelæren*, og anført af Hilbert tog den næste generation af matematikere teorien til sig.

Nogle uendeligheder er større end andre

Læser man beskrivelsen af mængden $\mathbb{R}$ ovenfor, så er det klart, at der sker et spring i kompleksitet i forhold til mængden $\mathbb{N}$: Mængden $\mathbb{N}$ er nemlig "bare" resultatet af en enkelt uendelig proces, nemlig at blive ved med at lægge 1 til i al evighed. Men $\mathbb{R}$ er det samtidige resultat af *alle* tænkelige approksimationsprocesser i Cauchys forstand.

Da vi talte om Hilberts hotel indså vi, at der er lige så mange ulige positive hele tal som der er positive hele tal, fordi de kan sammenparres en-til-en, som portieren gjorde. Cantor må have spurgt sig selv, om $\mathbb{R}$ virkelig er et mere kompliceret objekt end $\mathbb{N}$, eller om det bare ser sådan ud. Helt konkret undersøgte han, om $\mathbb{R}$ er lige så stor en (uendelig) mængde som $\mathbb{N}$, altså om elementerne i $\mathbb{R}$ (dvs. reelle tal) kan parres sammen en-til-en med tallene 1,2,3,4, Til Cantors forbauselse opdagede han, at *det kan man ikke* (se faktaboks).

Det er klart, at mængden $\mathbb{R}$ er mindst lige så stor som mængden $\mathbb{N}$, for ethvert positivt helt tal er jo også et reelt tal. Så Cantors opdagelse er altså, at $\mathbb{R}$ er en uendelig mængde, som er større end den uendelige mængde $\mathbb{N}$. Cantor havde dermed opdaget, at *nogle uendeligheder er større end andre*. Snart opdagede han, at der findes uendeligt mange niveauer af uendelighed, og uendeligheder, der er langt, langt større end $\mathbb{N}$ og $\mathbb{R}$.

Fra Kontinuumshypotesen til i dag

Cantor stillede det naturlige spørgsmål, om der findes niveauer af uendelighed mellem $\mathbb{N}$ og $\mathbb{R}$. Dette problem optog Cantor meget, og han formulerede i 1878 den såkaldte kontinuumhypotese. Den siger, at der findes intet niveau af uendelighed mellem niveauet af $\mathbb{N}$ og niveauet af $\mathbb{R}$.

Hilbert promoverede problemet som et af matematikkens vigtigste uløste problemer. Først i 1938 skete der for alvor fremskridt, da den østrigske logiker Kurt Gödel beviste, at på baggrund af de accepterede grundprincipper (aksiomer) for matematik *kan man ikke bevise, at Kontinuumshypotesen er falsk*.

I 1963 beviste den amerikanske matematiker Paul Cohen, at på baggrund af de accepterede grundprincipper for matematik *kan man ikke bevise, at Kontinuumshypotesen er sand*! Dette arbejde vandt Paul Cohen i 1966 matematikkens fornemste pris, Fields Medaljen, for.

Det kan virke mærkeligt, at der er noget i matematik man hverken kan bevise eller modbevise. Hvis man hverken kan bevise eller modbevise Kontinuumshypotesen, er den så sand eller falsk? Pointen er, at det er viden, vi *ikke* kan opnå på baggrund af de grundprincipper, matematikken er bygget på i dag. Det udelukker dog ikke, at der en dag vil blive fundet nye grundprincipper, som afgør spørgsmålet, og det er et forskningsområde, som særligt den amerikanske mængdeteoretiker Hugh Woodin har stået i spidsen for siden midten af 1980'erne.

Man møder en lignende situation i klassisk Euklidisk geometri. Parallelpostulatet i Euklids geometri er det, der sikrer at vinkelsummen i en trekant er 180 grader. I tusindvis af år forsøgte man at bevise Parallelpostulatet på baggrund af de *andre* postulater og aksiomer i Euklids geometri, men i begyndelsen af 1800-tallet blev det opdaget, at man hverken kan bevise eller modbevise parallelpostulatet.

Hvor har alt dette siden ført os hen? Cohens metode, som kaldes *forcing*, førte i de følgende årtier til en enorm matematisk udvikling. Det viser sig, at størrelsen af uendelige mængder er meget plastisk, og kan manipuleres ved at skifte mellem forskellige mængdeuniverser, som kaldes *modeller*. Når størrelsen på en uendelig mængde kan ændre sig fra en model til en anden, er det groft sagt, fordi en model kan have større "regne-

kraft" end en anden. Derfor er størrelsen af mængder nært forbundet til *informationsindhold* og *kompleksitet*. De amerikanske matematikere Donald Martin og Harvey Friedman lagde i 1970'erne grundstenen til en vidtrækkende teori om forbindelse mellem netop uendelighed og kompleksitet. Forbindelsen beskrives ved hjælp af spil.

Uendelige spil, selvfølgelig! ■

VIDERE LÆSNING

En fin introduktion til Hilberts hotel og anden sjov leg med uendelighed er Flemming Topsøe: *"Jessens Balsal, Hilberts Hotel -- en appetitvækker"* (i Matematiske Ideer, Matematiklærerforeningen, 1993), og i G. Gamow: *"One Two Three... Infinity"* (genoptrykt af Dover Publications, 2003).

En yderst velskrevet bog, som dog også er noget mere ambitiøs, er J. Stillwell: *"Roads to infinity"* (A.K. Peters, 2010).

En seriøs oversigt over, hvor Kontinuumshypotesen står i dag, kan findes på: plato.stanford.edu/entries/continuum-hypothesis/

En avanceret bog, der dækker store dele af den nyere udvikling som forbinder uendelighed, spil, og modeller kan findes i A. Kanamori: *"The higher infinite"*, Springer, 2003.

.....

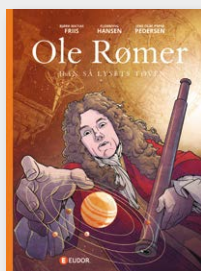
BØGER ■

OLE RØMER – HAN SÅ
LYSETS TØVEN

For præcis 350 år siden påviste Ole Rømer i Paris lysets endelige hastighed. Men Rømer var langt mere end astronom – Det danske multigeni fik også springvandene i Versailles til at fungere, underviste solkongen Ludvig XIVs søn, forberedte indførelsen af den gregorianske kalender i Danmark-Norge, opmålte Danmark og udviklede en temperaturskala, som inspirerede Fahrenheit. Som Københavns borgmester fornyede han byens kloakker, indførte gadebelysning og renoverede fattigvæsenet. Alt det og mere til kan man læse om i tegneserien *Ole Rømer – han så lysets tøven*, der netop er udkommet.

■ Bjørk Matias Friis, Flemming Hansen og Jens Olaf Pepke Pedersen: *Ole Rømer – han så lysets tøven*.

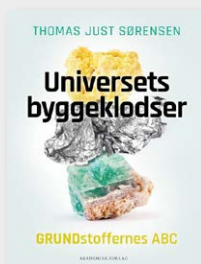
Forlaget Eudor 2026. 104 sider, 250,- kr.



UNIVERSETS BYGGEKLODSE

Når USA mangler adgang til sjældne jordarter (og derfor er ude efter Grønland), når din computers harddisk bliver dyrere, når medierne flyder over med historier om batterier, litium, elnettet, kobberledninger og CO₂, handler det faktisk alt sammen om grundstoffer. Og for at forstå det, har man brug for basal kemisk viden. *Universets byggeklodser* er en guide til grundstofferne og det periodiske system. Du lærer, hvor de forskellige grundstoffer kommer fra, hvordan vi bruger dem i hverdagen, og hvorfor de er afgørende for alt fra indmaden i din telefon over sukkeret, du spiser, og til de pigmenter, der giver farve til din verden.

■ Thomas Just Sørensen: *Universets byggeklodser*. Akademisk Forlag 2026. 288 sider, 320,- kr.

NATUR OG MILJØ I
DE HØJE BJERGE

Hvert år strømmer millioner af mennesker mod bjergområder over hele verden. Alperne alene modtager omkring 95 millioner endagsturister årligt. Turismen sætter tydelige spor: Veje, svævebaner, snekanoner, mountainbikespor, hoteller og forlystelsesområder breder sig stadig længere op i højderne. Det fortæller lektor i ferskvandsbiologi ved Københavns Universitet, Dean Jacobsen, i sin nye bog om natur, miljø og menneskeliv i verdens højeste bjerge. Han har i årtier forsket i bjergsøer og bjergvandløb. I bogen beskriver han både bjergenes fascinerende natur og de voksende udfordringer, som klimaændringer og menneskelig udnyttelse skaber i nogle af verdens mest sårbare områder. Samtidig er det også en personlig bog.

■ Dean Jacobsen: *Natur og miljø i de høje bjerge*. Skriveforlaget 2026. 244 sider, 299,95 kr.



DET USYNLIGE LIV

Den mikrobielle verden er usynlig for os mennesker – men ikke desto mindre er den afgørende for vores liv og levned. Mikrobernes verden rummer både det forunderlige, vidunderlige, farlige og hjælpsomme for os. Historierne er gode, perspektiverne mange. Den danske forskning i mikrobiologien tog fart allerede i slutningen af 1800-tallet, og de danske forskere var med i allerforreste række. Det er heldigvis et særkende, Danmark har kunne holde fast i og udbygge.

■ Jan Sørensen og Søren Molin: *Det usynlige liv*. Polyteknisk Forlag 2026. 264 sider, 349,- kr. (er også udkommet på engelsk).



ET SMUGKIG PÅ DRØMME- UDDANNELSEN

Send dine elever i Studiepraktik i uge 43

Hvordan føles det egentlig at være universitetsstuderende?

Med Studiepraktik kan dine elever – og tidligere elever på sabbatår – få et smugkig på studielivet på en udvalgt uddannelse.

I op til tre dage i uge 43 prøver de undervisningen, mærker studielivet helt tæt på og finder ud af, hvordan det egentlig er at gå på en videregående uddannelse.

Studiepraktik finder sted på AU's campusser i Aarhus, Herning, Viborg og Emdrup.



AARHUS UNIVERSITET



Find tilmelding og mere info
bachelor.au.dk/tvivi/besoeg/praktik



Er mænd virkelig fra Mars?

■ Af Jeppe Kyhne Knudsen, Aktuell Naturvidenskab

De fleste kender nok udsagnet: Mænd er fra Mars, kvinder er fra Venus. Det er titlen på en berømt selvhjælpsbog skrevet af parterapeuten John Gray i 1992. En titel han brugte som en metafor for mænd og kvinders forskelligheder. Som krigsguden Mars, mente han, er mænd mere resultatorienterede og løsningsfokuserede, mens kvinder ligesom kærlighedsgudinden Venus i stedet er fokuseret på relationer, kommunikation og følelsesmæssig støtte.

Selvom bogen blev en kæmpe bestseller, er den siden blevet udskældt for at bygge på en forsimplet og binær opfattelse af forskellen på mænd og kvinder. Ved at portrættere mænd og kvinder som fundamentalt forskellige og kun betragte det heteroseksuelle forhold, giver bogen meget lidt plads til den store forskel, der findes inden for hvert køn. Siden bogen udkom, har forskning vist, at forskellen mellem individer ofte er langt større end de gennemsnitlige forskelle mellem kvinder og mænd. Hjerneforskning viser desuden, at der ikke findes en kvinde og mande-hjerne, men at forskellen er størst på individniveau.

Det betyder dog ikke, at køn er irrelevant indenfor biologien. Især når det kommer til sundhedsforskning. I nogle sammenhænge finder forskerne forskelle på, hvordan mænd og kvinder reagerer på påvirkninger fra miljøet omkring dem. Det gælder eksempelvis bakterierne i vores soveværelser. Lektor Tina Santl-Semkiv fra Institut for Biologi på Aarhus Universitet har, sammen med en gruppe andre forskere, fundet ud af, at mænd trives i et soveværelse fyldt med mange forskellige bakterier. De får ligefrem en bedre lungefunktion af det. Kvinder oplever derimod mere inflammation, jo flere forskellige bakterier, der findes i soveværelset.

Ved at opstille såkaldte støvopsamlere i soveværelset i mere end 1000 boliger i fem forskellige nordiske byer, har de vist, hvilke bakterie-typer der lever i soveværelset. Den data har de samkørt med meteorologiske data, antallet af beboere, om de har kæledyr, husets alder, hvor ofte de gør rent og lufter ud, samt deltagernes helbredsoplysninger og vaner. Alt det viser altså, at mænd trives bedre i soveværelser med en større diversitet af bakterier, mens kvinder lider under det.

Og hvordan ændrer man så på bakteriesammensætningen i sit soveværelse? Ifølge Tina Santl-Semkiv er der flere måder.

»Åbner du vinduet, når det blæser, vil flere forskellige udendørs bakterier. Holder du hund, slæber den typisk flere typer bakterier ind, stueplanter har også en positiv effekt, og du kan også vælge at gå ind i sko for at slæbe mere skidt med hjem,« siger hun.

Hun understreger, at resultatet står alene, og at andre studier skal bekræfte det, før vi kan være helt sikre.

»Der er ingen grund til at komme op at skændes over indeklimaet i soveværelset derhjemme. Vores resultater viser, at der er en sammenhæng, men de forklarer ikke mekanismen bag. Desuden skal andre studier vise det samme, før vi kan slå det helt fast,« siger hun.

Kilde: *Int. J. Hyg. Environ. Health*, Vol. 274, 2026, 114780

Forskningen er lavet af Tina Santl-Semkiv i samarbejde med professor Torben Sigsgaard, professor Vivi Schlünssen, Randi Bertelsen and Hesham Amin.

»... lige der tændtes der et eller andet i mig.
Jeg måtte finde ud af, hvad kaskelothvaler
bruger deres store næse til«,
Peter Teglberg Madsen.