

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur*VIDENSKAB

AMPÈRE SATTE MÅL PÅ DEN ELEKTRISKE STRØM



Bakterier slås om pladsen i en biofilm
Vand: glassets ven eller fjende?
Kan en orm hjælpe med
produktionen af fisk?

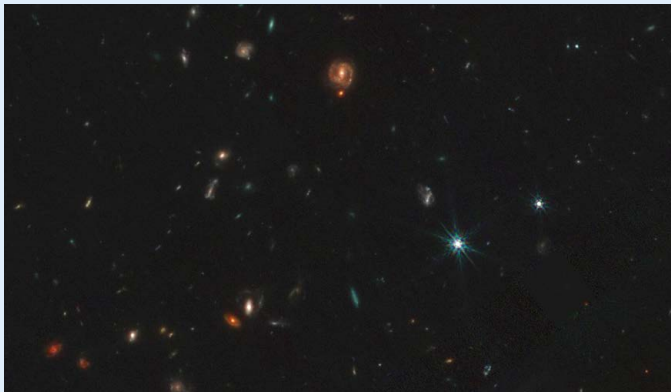


Foto: JWST/Darach Watson

Røde huller

Rumteleskopet James Webb har siden 2021 leveret billeder af det fjerne univers. På billederne optræder der blandt stjerner og galakser nogle markante røde prikker, som indtil nu har været et mysterium for forskerne. De findes så langt ude i rummet, at lyset fra dem stammer fra da Universet kun var nogle hundrede millioner år gammelt. Og knap en milliard år senere, var de lysende røde prikker forsvundet. Forskere ved Cosmic Dawn Center på Niels Bohr Institutet har nu fundet en forklaring: De røde prikker er unge sorte huller, indhyllet i en puppe af gas, som de er i gang med at "fortære" og dermed vokse sig store. Processen udvikler en enorm varme, der lyser så kraftigt, at det kan ses gennem gaspuppen. Lysets stråling igennem gassen er det, der giver de røde prikker deres unikke udseende.

Kilde: KU/Nature

Quizen

Hvad er en biofilm?

1. En fotografisk film lavet af organisk materiale
 2. Et tyndt, klæbrigt lag af mikroorganismer, der hæfter sig på en overflade og organiserer sig i en fælles matrix
 3. En særlig type bakterie, der kun findes i vandige miljøer
- Find svaret i artiklen side 6.

Kødæder med veganertræk

Analysen af de stabile nitrogen-isotoper N-15 og N-14 i knogler og hår bliver brugt til at afsløre, hvad dyr og mennesker spiser. Det skyldes, at den tunge isotop N-15 opkoncentreres gennem fødekæden. En planterig kost vil derfor give lavere værdier end en kødrig. I et nyt studium har forskere fra Wiens Universitet i Østrig målt nitrogen-isotoper i pels og knurhår fra almindelige huskatte – som jo fra naturens side er ægte kødædere – samt i kattefoder fra supermarkedet og sammenlignet med værdier målt i hår fra mennesker på forskellig kost. Det viste sig, at isotopværdierne i hår fra kattene lå tæt på dem fra mennesker, der var veganere. Man skal altså være varsom med at tolke kosttype ud fra isotop-signaturer i hår alene.

Kilde: *Front. Ecol. Evol.*, doi.org/10.3389/fevo.2025.1699291



Foto: Shutterstock



Foto: Colourbox

Skovrejsning mangler taks

»Jeg kan ikke erindre, at jeg nogensinde har set et skovrejsningsprojekt i Danmark, hvor man har plantet taks. Det er lidt underligt, for taks er en hjemmehørende art og en af kun tre nåletræer, der er hjemmehørende i klassisk snæver forstand.« Sådan siger professor Jens-Christian Svenning fra Aarhus Universitet, der for nylig sammen med internationale kolleger har udgivet et nyt videnskabeligt syntese-studie om takstræet i tidsskriftet *Trees, Forests and People*. Ifølge professoren bør taks tænkes ind i skovrejsningsprojekter, da det er helt anderledes end vores andre nåletræer i den danske natur. Det bærer bær, som fuglene er glade for, og fordi det er stedsegrønt og vokser lavt og tæt, giver det vinterlyt til dyrene. Og modsat enebær kan taks trives under mere skyggede forhold. Træet skaber med andre ord strukturelle elementer i naturområder, som ingen af vores andre træer kan.

Kilder: *bio.au.dk* / doi.org/10.1016/j.tfp.2025.101093

Havtemperatur på -15 grader

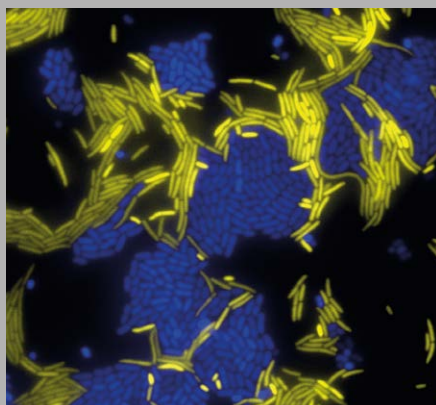
For omkring 700 millioner år siden var Jorden stort set dækket af is – en teori kendt som Snowball Earth. På det tidspunkt nåede isdækket således helt til ækvator. Det havde store konsekvenser for de marine økosystemer, som blandt andet kan ses ved, at jern, der normalt ville være blevet oxideret af ilt fra fotosyntetiserende mikroorganismer, i stedet blev aflejret på havbunden som jernrige sedimenter. I et nyt studium har forskere fra Kina, Australien og USA undersøgt jernisotoper i de sedimentære bjergarter fra "Snowball Earth-tiden" rundt omkring på kloden og udforsket forskellige scenarier for, hvordan de er dannet. Forskerne rapporterer, at nogle usædvanlige høje isotopværdier kan forklares med temperaturafhængig fraktionering i ekstremt kolde og meget saltholdige bassiner i Snowball Earth-havet. Her har havtemperaturen angiveligt været -15 °C med en usikkerhed +/- 7 grader. Det er den laveste havtemperatur, der nogensinde er registreret – koldere end i såkaldte brine pools, man kender fra Antarktis.

Kilde: *Nat Commun* 17, 462 (2026).

Aktuel Naturvidenskab retter

I artiklen *En enhed så gammel som civilisationen* i nummer 5/2025 optrådte der sidst i en faktaboks om Huygens ligning en formel, der angiveligt skulle beskrive et penduls svingningstid uden for vakuum. Det er imidlertid ikke korrekt, da formelen – ligesom Huygens ligning – ikke tager højde for luftmodstand. I stedet beskriver den et pendul i vakuum, hvor massen er fordelt over pendulets udstrækning i stedet for koncentreret i et punkt.

indhold



Bakterier slås om pladsen i en biofilm

Forsker tager os med ind i bakteriernes mikroskopiske verden og belyser den rolle, som fysik har for deres liv i en biofilm.

6



Vand: glassets ven eller fjende?

Glas er skrøbeligt og går let i stykker. Derfor arbejder forskere på at udvikle nye metoder til at forbedre styrken af glas – blandt andet ved at bruge vanddamp.

12



Ampère satte mål på den elektriske strøm

Ampere er SI-enheden til måling af elektrisk strømstyrke. Den franske matematiker og fysiker André-Marie Ampère skabte det teoretiske grundlag for begrebet elektrisk strøm.

26



Smagsdektiver på arbejde – på sporet af planten silphium

Silphium var en af antikkens mest værdifulde handelsvarer. En nyfundet plante i Anatolien påstås nu at være den forsvundne silphium, men passer det?

32

FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 6 Bakterier slås om pladsen i en biofilm
- 12 Vand: glassets ven eller fjende?
- 18 Kan en lille orm hjælpe med produktionen af fisk?
- 23 Sådan virker fugles nethinder uden ilt
- 26 Ampère satte mål på den elektriske strøm
- 32 Smagsdektiver på arbejde – på sporet af den forsvundne silphium
- 38 Forskere sætter nanomotorer i bevægelse i kunstige celler
- 40 BAGSIDEN:
Jule på kemiholdet

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Ansvarshavende

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

Redaktion

Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard
Tlf.: 3036 0660 / 3036 0662 / 8715 2094
E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Redaktionsgruppe

- Carsten Rabæk Kjaer, Aktuel Naturvidenskab
- Jørgen Dahlgaard, Aktuel Naturvidenskab

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

Abonnementsservice:

Tlf.: 3036 0662 eller abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Udgiver

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

Postadresse:

Aktuel Naturvidenskab,
Ny Munkegade 120, Bygning 1520,
DK-8000 Aarhus C

Layout:

Jørgen Dahlgaard

Tryk:

Jørn Thomsen Elbo A/S

ISSN:

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

Oplag: 3.700

Forsidefoto:

Elektrisk kredsløb med amperemeter fra samlingen på Steno Museet i Aarhus.
Foto: Peter Gammelby.



SPONSOR-
ABONNENT



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

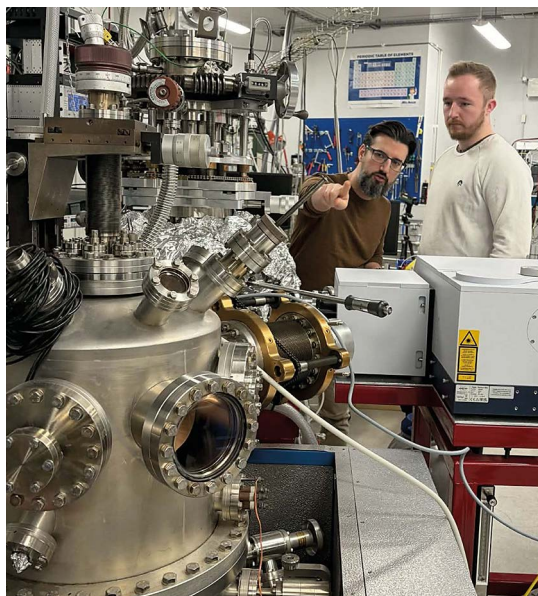
Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: aktuelnaturvidenskab.dk

Peptider kan dannes spontant i rummet

På Aarhus Universitet efterligner forskerne Alfred Thomas Hopkinson og Sergio Loppollo fra Center for Interstellar Catalysis forholdene i det interstellare rum i et avanceret laboratorium. Nu har de sammen med kolleger fra centeret samt internationale samarbejdspartnere vist, at forstadier til proteiner – såkaldte peptider – kan dannes ude i rummet.

Tidligere forskning har vist, at simple aminosyrer som glycin dannes i det interstellare rum. Men hidtil har man ikke vist, om mere komplekse molekyler som peptider også kan dannes naturligt på overfladen af støvkorn, inden de indgår i dannelsen af stjerner og planeter. Peptider består af aminosyrer, der er bundet sammen i korte kæder. Når peptider bindes yderligere sammen, danner de proteiner, som er essentielle for liv, som vi kender det. Derfor er jagten på proteinernes forstadier afgørende i studiet af livets oprindelse.

De to forskere har været i Ungarn for at bruge det europæiske atomforskningsanlæg HUN-REN Atomki. På anlægget er der både et



Sergio Loppollo (tv) og postdoc Alfred Hopkinson i laboratoriet på Aarhus Universitet. Foto: Signe Kyrkjebø

kammer med ultrahøjt vakuum og mulighed for at bestråle dets indhold med højenergi-protoner. Bagefter kunne de i laboratoriet i Aarhus analysere, hvordan glycin-molekylerne havde klarer det voldsomme stråle-bombardement. Resultatet var noget af et gen-

nembrud: Glycinmolekylerne begyndte at reagere med hinanden og danne peptider og vand. Det tyder på, at den samme proces foregår i det interstellare rum – et skridt på vejen mod, at proteiner kan dannes på støvpartikler.

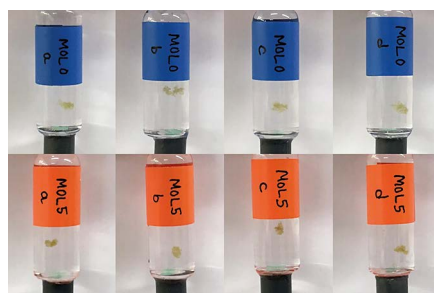
Man har tidligere ment, at kun meget simple molekyler kan dannes i de enorme støvskyer mellem stjernerne, hvor nye stjernesystemer bliver til, og at mere komplekse molekyler først opstår langt senere, når gasserne begynder at samle sig i en skive, som til sidst bliver til en stjerne. Opdagelsen er betydningsfuld, fordi den antyder, at disse essentielle molekyler for liv er langt mere udbredte i universet, end man hidtil har troet. Da alle typer aminosyrer bindes til peptider gennem den samme reaktion er det sandsynligt, at også andre peptider dannes naturligt i det interstellare rum, mener forskerne. Det vil

de gerne undersøge i fremtiden – ligesom de også gerne vil undersøge, om andre af livets vigtige byggesten som membraner, nukleobaser og nukleotider dannes naturligt i rummet.

CRK, Kilder: Nat Astron 2026 / eurekaalert.org/news-releases/1113277

Dybhavets mikrober får uventet energiboost

Imange år har dybhavet været betragtet som et meget næringsfattigt miljø. Men ny forskning ledet af biologer fra Biologisk Institut på Syddansk Universitet viser nu, at næringsstoffer i dybhavet måske slet ikke er så sparsomme, som man hidtil har troet. Studiet, der for nylig er publiceret i *Science Advances*, viser, at synkende organiske partikler – kendt som marin sne – begynder at lække opløst carbon og nitrogen, når de når ned i 2–6 kilometers dybde. Dermed får mikroberne i det omgivende vand tilført næring. Lækagen skyldes det intense tryk i dybhavet, der virker som en kæmpe saftpresser, der presser opløste organiske forbindelser ud af de synkende partikler. Og dem kan mikroberne optage med det samme. Ifølge undersøgelsen kan de synkende partikler lække op til 50 procent af deres oprindelige carbon og 58–63 procent af deres oprindelige nitrogen.



"Marine snefug" klar til eksperimenter i trykkammeret. Foto: Peter Stief.

Studiet har også betydning for forståelsen af det globale carbonkredsløb. Når synkende partikler mister så store mængder carbon, før de når havbunden, bliver der begravet mindre carbon i dybhavets sedimenter end tidligere antaget. I stedet forbliver det opløste carbon i dybhavets vandsøjle, hvor det kan opholde sig i hundreder til tusinder af år, før det vender tilbage til havets overflade og

atmosfæren. I dybhavssedimentet derimod kan carbon forblive begravet i millioner af år, og over tid bliver der opbygget enorme mængder. Den olie og gas, vi udvinder i dag, er i store træk dannet på denne måde.

Til det aktuelle studie fremstillede forskerne deres eget marine sne i laboratoriet ud fra kiselalger, som naturligt klumper sammen og danner marin sne i havet. Derefter anbragte forskerne deres partikler i specialdesignede, roterende tryktanke med vand for at teste, hvor meget carbon og nitrogen, der kan lække under tryk. Næste skridt for forskerne bliver at undersøge, om de kan finde tegn på processen direkte i havet. Det håber de at kunne gøre på en kommende ekspedition til Arktis med det tyske forskningskib Polarstern.

CRK, Kilde: SDU / DOI: 10.1126/sciadv.aec5677

Sådan kan cellen begrænse DNA-kopiering

Hvordan undgår organismen, at DNA kopieres vildt og ukontrolleret i forbindelse med de livsnødvendige celledelinger? Dette spørgsmål har forskerne tumlet med i snart 60 år. Gennem de seneste årtier har videnskabelige studier peget på, at der må eksistere en form for begrænsende faktor, der forhindrer DNA i at replicere uhæmmet, spille ressourcer og skabe for mange kopieringsfejl. I et nyligt internationalt studium publiceret i *Nature* mener forskerne nu at have identificeret en sådan begrænsende faktor. Studiet er ledet af Kumar Somyajit Laboratory ved Syddansk Universitet, hvor førsteforfatteren Gita Chhetri er ph.d.-studerende.

Når celler deler sig, skal de først kopiere deres DNA, så hver ny celle får en komplet genetisk plan. Den ene DNA-streng bliver dog produceret i mange korte stykker, kaldet Okazaki-fragmenter, som efterfølgende skal behandles og "syes" sammen til en kontinuerlig DNA-streng. Dette vigtige trin afhænger



Illustration: Colourbox

af et ringformet protein kaldet PCNA, der sidder på DNA'et og organiserer de proteiner, der fuldfører replikationen.

I deres artikel beskriver forskerne, hvordan denne "sammensyning" har en indbygget kapacitetsgrænse i raske celler. Forskerne har identificeret proteinet PAF15 som den naturlige bremse, der forhindrer replikationsmaskineriet i at blive overbelastet og beskytter celler mod det værste tænkelige: replikationskatastrofe.

Interessant nok findes PAF15 kun hos højere dyr – inklusive mennesker – hvilket tyder på, at det er en relativt ny evolutionær "opfindelse". Celler producerer kun en begrænset

mængde PAF15, og når denne mængde er opbrugt, må DNA-replikationen stoppe. At holde PAF15 på et nøje reguleret niveau ser altså ud til at være en grundlæggende mekanisme, som celler bruger til at holde DNA-replikationen afbalanceret, sikker og kontrolleret, mener forskerne.

I kræftceller ser billedet helt anderledes ud. Tumorer presser replikationen til det yderste for at dele sig hurtigere, og PAF15 kan være til stede i kræftceller i langt højere niveauer for at understøtte denne hastige vækst. Men forskerne peger på, at dette også kan udgøre en sårbarhed: Ved at gå efter netop dette replikationskontrollsystem kan man muligvis svække – eller ligefrem dræbe – hurtigt delende tumorceller. Derfor planlægger forskerholdet nu at udvide studierne til at omfatte forsøg med celler fra kræftpatienter i samarbejde med onkologer fra Odense Universitetshospital.

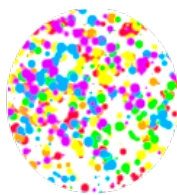
CRK, Kilde: SDU/ *Nature* (2026).
doi.org/10.1038/s41586-025-10011-3

Kemi mod forfalskning

Hvert eneste år handles der ulovlige kopivarer i verden i et omfang, der betyder milliardtab for virksomhederne med ejerskab til produkterne. Og problemet er stigende. Det problem har kemiker Thomas Just Sørensen fra Københavns Universitet opfundet et våben mod. Han har sammen med danske iværksættere og investorer udviklet en teknologi kaldet O-KEY – en slags digitalt fingeraftryk, der gør det muligt unikt at identificere et fysisk produkt helt ned på enkeltstyksniveau. Fingeraftrykket består af et mikromærke på cirka én kvadratmillimeter, som sprayes på varen eller emballagen med gennemsigtigt blæk. Blækket indeholder mikropartikler, der sætter sig i et helt tilfældigt mønster. Da partikelfordelingen aldrig kan genskabes nøjagtigt, fungerer mærket som en slags materialebaseret kryptografisk nøgle.

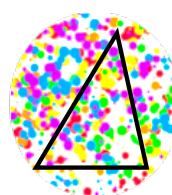
Selve mærket indlejres i et lille område på selve produktet eller emballagen, for eksem-

Stokastisk proces →



Tilfældigt, komplekst mønster

Definer O-KEY →



Læseområde

Mærk produkt →



O-KEY®

Register



Ground Truth



Princippet i at mærke et produkt med O-KEY. PUF står for physically unclonable functions.

pel som en del af en QR-kode, hvor det kan scannes med en almindelig smartphone. Scanningen matcher billedet af mønsteret med en krypteret database, og resultatet fungerer som juridisk anerkendt dokumentation for, at produktet er ægte.

O-KEY udspringer af flere års forskning i materialekemi på Københavns Universitet. Forskningen er omsat til virksomheden PUFIN-ID, som har udviklet både mærkningsmaskiner, en IT-infrastruktur,

mobil-app og en AI-løsning, der håndterer de mange millioner digitale fingeraftryk, teknologien genererer. Virksomheden har i dag 16 ansatte i København. For nylig er den danske porcelænsvirksomhed Royal Copenhagen begyndt at bruge O-KEY på deres produkter. Ud over kongeligt porcelæn har O-KEY-mærkerne indtil nu også siddet på blandt andet Kay Bojesen-figurer og internationale sikkerhedsprodukter.

CRK, Kilde: Københavns Universitet

Illustration: Thomas Just Sørensen

I de to flasker er lange og korte bakterier blandet i forholdet 1:1, hvor de har vokset i et vækstmedium natten over. Under disse betingelser har de korte bakterier en fordel, sammenlignet med, når bakterierne vokser i en biofilm på et fast underlag.

Foto: Liselotte Jauffred



BAKTERIER SLÅS OM PLADSEN I EN BIOFILM

Om forfatteren
Kristian Sjøgren er
videnskabsjournalist



**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. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er lektor ved DTU, Kirstine Berg-Sørensen. Se mere på www.dff.dk

Rigtig mange faktorer har betydning, når bakterier danner biofilm på for eksempel implantater, i fermenteringstanke eller i vores lunger og tarme. Biologi spiller selvfølgelig en stor rolle, men det gør fysik også. Forsker tager os med ind i bakteriernes mikroskopiske verden og belyser den rolle, som fysik har for deres liv i en biofilm.

Overalt i verden danner bakterier biofilm, som sætter sig på overflader som et lille biologisk lag. Det kan være i menneskekroppen, hvor bakterier danner biofilm på tarmvæggen eller på indersiden af vores lunger. Nogle af disse biofilm-lag kan være skadelige, men andre gange er bakterierne i biofilmene faktisk gavnlige for os. Det kan også dreje sig om biofilmdannelse på medicinsk udstyr som katetre eller pacemakere. Det er næsten altid et dårligt tegn. Biofilm kan også blive

dannet på udstyr i fødevarerindustrien, hvis det ikke bliver rengjort ordentligt. Det er også rigtig skidt, fordi det kan betyde, at produktionen må standses og alt renses. Endelig er naturen også fyldt med biofilm, der bliver dannet på alt fra sten til andre overflader i for eksempel vand.

Da biofilm findes overalt og også spiller en enorm stor rolle i forskellige henseender, har forskere i mange år interesseret sig for biologien i biofilm. Hvad består en biofilm af, hvilke bakterier dominerer i biofil-

men, og hvilke indbyrdes kampe findes der mellem de forskellige stammer af bakterier? Den slags spørgsmål er biologiske af karakter, men faktisk har de fysiske forhold i en biofilm også stor betydning for, hvordan en biofilm ser ud og fungerer. Netop det fysiske aspekt af en biofilm er det, som lektor Liselotte Jauffred fra DTU Bioengineering ved Danmarks Tekniske Universitet beskæftiger sig med.

»Det handler om at identificere "det andet" aspekt af biofilmdannelse

og ikke kun belyse de biologiske eller kemiske faktorer, men også de fysiske. Forståelsen af de fysiske faktorer med indflydelse på biofilmdannelse vil gøre os klogere på, hvordan vi kan styrke biofilm de steder, hvor det giver mening, og hvordan vi kan hæmme biofilmdannelse de steder, hvor vi ikke vil have det,» forklarer hun.

Bakterier opfører sig forskelligt i forskellige miljøer

En biofilm består af en række forskellige bakterier, der alle kæmper for at overleve og dele sig. Det sker i konkurrence med andre bakterier, og derfor foregår der reelt en krig i en biofilm, hvor de forskellige arter af bakterier på forskellige måder forsøger at bekæmpe hinanden og blive dominerende. Nogle går i kamp med et arsenal af kemiske våben, mens andre beskytter sig selv ved at danne netværk af fibre og proteiner som et mikroskopisk beskyttelsesrum. Men der foregår også en masse samarbejde og arbejdsfordeling til alles bedste. Det samlede resultat er komplekst patchworktæppe af forskellige bakterier i én stor koloni, hvor bakterierne indtager forskellige nicher i biofilmen og forsøger at holde fast på deres plads der.

Liselotte Jauffreds forskning går ud på at lave forsøgsopstillinger, hvor forskerne kan undersøge, hvordan forskellige aspekter af fysiske begrænsninger og mekanikken mellem bakterierne spiller en rolle for biofilmdannelsen og bakteriernes indbyrdes kamp. Hun forklarer, at det ikke er helt simpelt at studere bakterier i biofilm under "naturlige" forhold, og at det derfor kræver noget specielt af de anvendte forsøgsdesigns. For eksempel kan man godt studere interaktioner mellem forskellige bakterier i en væske i et reagensglas, men her vil de fysiske forhold slet ikke være de samme som i en biofilm. Vil man undersøge for eksempel antibiotikaresistens hos givne bakterier i en biofilm og gør det ved at udsætte bakterier i et reagensglas for forskellige former for antibiotika, vil man med



Biofilm optræder mange steder – fx på tænder, i vandrør, og i et blærekateter (scanningelektronmikroskop foto af bakterier). Fotos: Shutterstock.

Her finder du biofilm i dine omgivelser

I munden som tandplak: Biofilm sidder som et klistret lag på tænderne og giver huller i tænderne samt tandkødsbetændelse, hvis det ikke børstes væk.

Kroniske sår som ved for eksempel diabetiske fodsår. Biofilm holder bakterierne fast i såret og gør dem sværere at slå ihjel. Det forsinker sårhelingen og kan kræve hyppig rensning.

Urinveje og katetre: Biofilm kan sætte sig på katetre og i urinvejene. Det giver tilbagevendende blærebetændelser og kan blokere katetre.

Lungerne som ved cystisk fibrose. Bakterier danner langvarige infektioner, som holder betændelsen i gang og langsomt forringer lungefunktionen.

Øre-næse-hals som ved mellemørebetændelse eller bihulebetændelse. Biofilm gør infektionen sejlivet, så symptomerne kommer igen og igen.

Hjerteklapper og blodkarproteser: På kunstige eller beskadigede overflader kan biofilm give alvorlige infektioner (endokarditis), som kræver langvarig behandling og ofte operation.

Kontaktlinser og øjeudstyr: Biofilm på linser eller etuier kan give øjenbetændelse og hornhindeår, hvis hygiejnen svigter.

Ortopædiske og andre implantater som kunstige hofter, skruer ved brækkede knogler eller pacemakere. Biofilm kan gøre infektioner meget svære at behandle og føre til, at implantatet må udskiftes.

Drikkevand og bygninger, for eksempel på brusehoveder, vandhaner og rør. Biofilm kan gemme på bakterier som *Legionella* sp. Det kan give dårlig lugt/smag på vandet, trykfald i rør og øget korrosion.

Hjemmets afløb, opvaskemaskine, kaffemaskine og tandbørste. Fugtige steder får hurtigt biofilm, som kan lugte og sprede bakterier, hvis man ikke rengør jævnligt.

Fødevarerindustriens ståltanke, bånd og afløb. Biofilm kan forurene fødevarer med for eksempel *Listeria monocytogenes*, forkorte fødevarers holdbarhed og tvinge fabrikker til ekstra grundig rengøring.

Naturen: I vandløb og havet hjælper biofilm for eksempel med at nedbryde stoffer og holde stofkredsløbene i gang. Biofilm på skibsskrog kaldes biofouling og øger brændstofforbruget.

Spildevandsrensning: Her udnyttes biofilm positivt til at rense spildevand og fjerne forurening.



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Sådan danner bakterier en biofilm

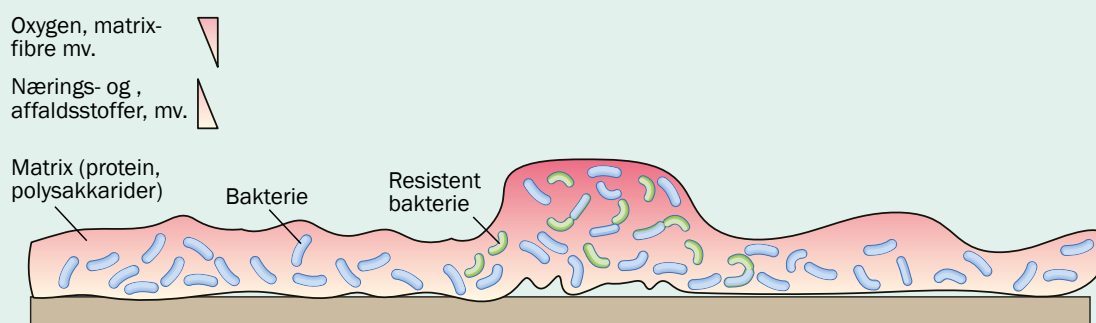


Illustration af en biofilm. De små trekanter øverst til venstre angiver, hvordan koncentrationen af forskellige andre komponenter varierer fra top til bund i biofilmen. Matrixfibre består for eksempel af proteiner og polysakkarider.

En biofilm er et tyndt, klistret lag af mikroorganismer, der hæfter på en overflade og indlejrer sig i deres egen "lim", som er en slags gel af polysakkarider, proteiner og DNA. Opbygningen af gelen starter, når overfladen først får et usynligt konditioneringslag af molekyler fra vand eller kropsvæsker. Pionerceller sætter sig efterfølgende fast på overfladen og begynder at udskille gelen, som virker som cement og forankrer bakterierne til overfladen. Cellerne deler sig i først små bakterieøer, der efterhånden forbindes til ét sammenhængende lag. I takt med, at flere bakterier kommer til, bliver biofilmen mere kompleks med større artsdiversitet og større funktionalitet. Biofilmen antager også en mere patchworkagtig struktur, hvor nogle dele af biofilmen fungerer på en måde, mens andre dele fungerer på en anden måde.

Fysisk er biofilmen kendetegnet ved at være viskoelastisk, hvilket vil sige at den både kan flyde lidt som en væske og samtidig har egenskaber som et elastisk materiale (på fagsproget siger man også, at biofilmen

opfører sig som en blød hydrogel). De viskoelastiske egenskaber gør, at laget af biofilm kan tåle for eksempel strømninger i vand, vibrationer og tryk uden at slippe overfladen. Samtidig kan der over tid også dannes vandfyldte porer og kanaler i biofilmen, hvilket kan føre næring og oxygen dybere ind i laget af bakterier og affaldsstoffer ud. Tykkelsen af en biofilm er typisk få til hundrede mikrometer, og der skabes gradienter gennem laget. Yderst er der mest oxygen og næring, mens der inderst er mindst. Det vil sige, at der gennem filmen bliver dannet forskellige lag, hvor forskellige bakterier kan udskære sig sin egen niche.

Biofilmens opbygning bremser også diffusion, så desinfektion og antibiotika trænger langsommere ind gennem lagene til bakterierne inderst inde. Bliver der revet flager af biofilmen, kan de føres videre i kroppen, i systemet eller i naturen og sætte sig fast et andet sted og starte nye biofilm. Overfladers ruhed, ladning og vandafvisning påvirker, hvor let biofilm dannes.

Billedet viser forskellige bakterier fra en luftprøve, som er groet på en agarplade. Man ser, at bakterierne danner kolonier af forskellig farve, størrelse og struktur.. Foto: shutterstock



andre ord ikke kunne være sikker på svaret. En bakterieart kan nemlig sagtens være følsom over for et antibiotikum i et reagensglas, men helt og aldeles ufølsom overfor det i en biofilm. Der kan tætheden mellem bakterierne og deres matrix nemlig gøre, at antibiotikummet aldrig kommer i nærheden af bakterien.

Sammen med sine kolleger arbejder Liselotte Jauffred med bakterier i idealiserede modelsystemer, hvor hun farver bakterierne, så hun kan følge, hvordan de enkelte bakteriearter udvikler sig i kolonien eller biofilmen. Det vil sige, at bakterien X måske bliver farvet rød, Y blå og Z

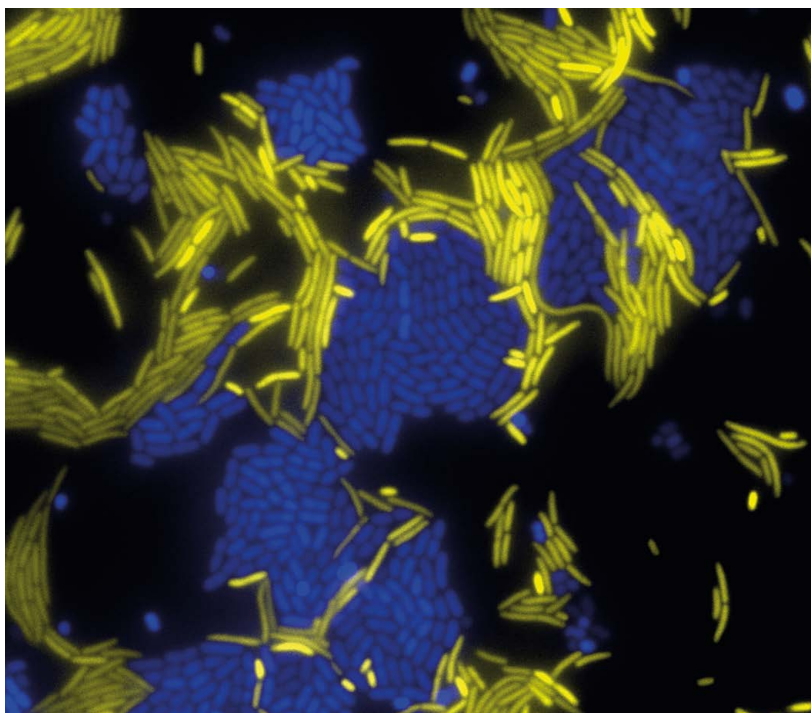
grøn. Forskerne kan derefter følge, hvordan de forskellige bakterier deler sig og bliver til flere eller færre over tid. De kan også se, hvordan de organiserer sig i den samlede biofilm, og hvad der sker i kontaktskaderne mellem de forskellige stammer af bakterier.

»Denne rumlige organisering er afgjort af bakteriernes gener, men også de fysiske forhold. I en væske kan bakterierne blive ved med at dele sig, så længe der er vækstmedie nok, men på en agarplade omgivet af andre bakterier kommer de fysiske begrænsninger for vækst i spil. Så har selve organiseringen indflydelse på, hvad generne kan få lov til at udtrykke,« siger Liselotte Jauffred.

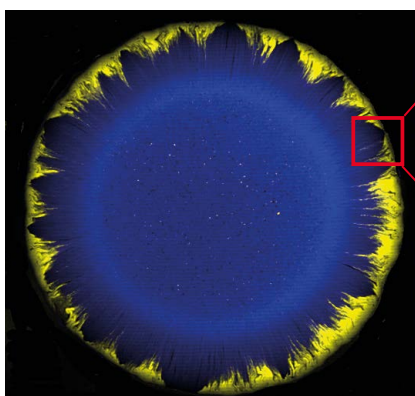
Bakteriers form giver en overlevelsesfordel i en biofilm

Et af Liselotte Jauffreds seneste forsøg var som eksempel med formålet at undersøge, hvordan en bakteries fysiske form har betydning for dens muligheder i en biofilm. En bakterie som colibakterien er stavformet, og det har betydning for, hvilken rolle den kan spille i en biofilm – uafhængigt af alle mulige biologiske forhold. I forsøget undersøgte forskerne mutationer i colibakteriernes gener for dannelsen af cytoskelettet, der er med til at give colibakterien sin form. Disse mutationer gjorde blandt andet, at colibakterierne blev mere runde i formen og mistede deres stavformede struktur. Efterfølgende lod forskerne både normale stavformede colibakterier og runde colibakterier danne en biofilm sammen og undersøgte så, hvordan formen havde betydning for deres individuelle organisering og overtag i biofilmen. Forsøget viste, at når bakterierne ikke længere var stavformede, groede de helt anderledes og dannede helt andre mønstre i biofilmen.

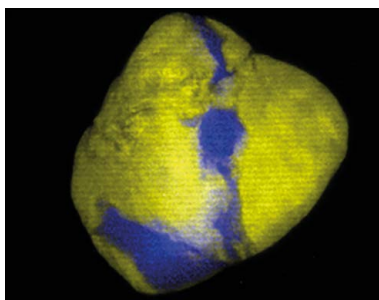
Forskernes egentlige spørgsmål var, om de runde eller stavformede bakterier ville vinde en kamp mellem de to i en biofilm, og hvordan den fysiske form havde betydning for udfaldet af denne kamp, hvis der



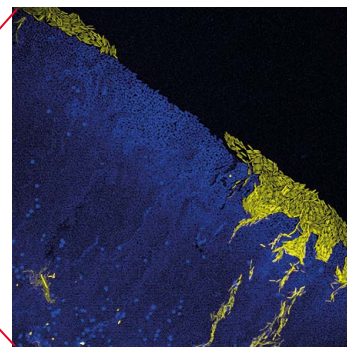
Lange (gule) og korte (blå) bakterier er her blandet i forholdet 1:1 og har fået lov til at vokse på en agarplade i 6 timer. Bemærk, at de lange bakterier organiserer sig i bånd, hvor de ligger parallelt med hinanden (orden), mens de korte orienterer sig mindre i forhold til hinanden (uorden).



Her er de lange (gule) og korte (blå) bakterier blandet i forholdet 1:1000, og de har fået lov til at vokse på en agarplade i 24 timer. De lange vinder hver gang ved at overtage den voksende frontlinje – selv når de er i mindretal.



Her er bakterierne groet i 3D (i stedet for på en agarplade), igen i blandingsforholdet 1:1000 og i 24 timer. Også i dette tilfælde overtager de lange (gule) bakterier, men langsommere. Det er selvfølgelig sværere at overtage overfladen af en kugle (effektivt 2D) end randen af en cirkel (effektivt 1D).



Når vi zoomer helt ind på frontlinjen, ser vi, hvordan de lange bakterier (gule) gror langsomt henover frontlinjen, indtil de fuldstændig har afskåret de kortes (blå) adgang til plads og næring.

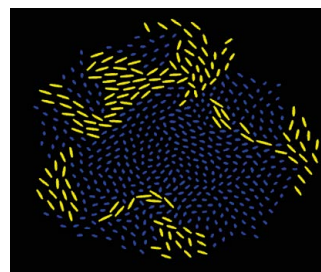
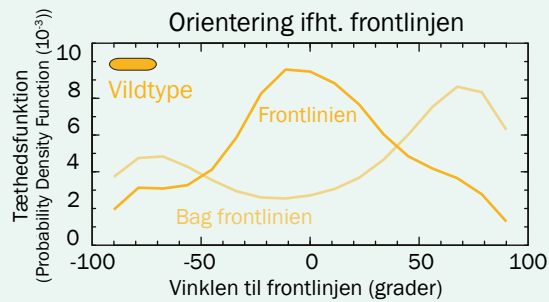


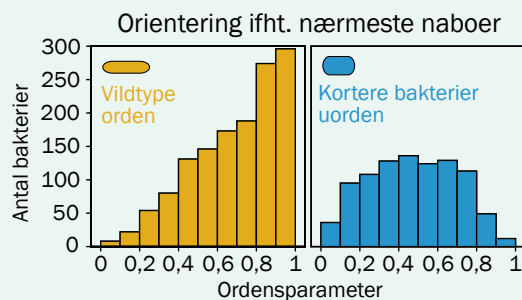
Illustration af den såkaldte agent-baserede matematiske model. Den er supersimpel på den måde, at den eneste forskel på de to slags celler er deres længde (lange og korte). Alligevel kan vi med modellen genskabe alle vores eksperimentelle resultater. Det understøtter vores påstand – at det er formen, der betyder alt her.



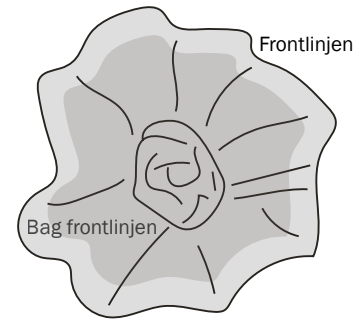
**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



Graferne viser fordelingen af vinklen mellem de lange bakterier og koloniens frontlinje henholdsvis bag frontlinjen og netop på frontlinjen. Af dette resultat kan vi se, hvordan de lange bakterier i kolonien organiserer sig i bånd, der stråler ud fra midten, og hvordan de på frontlinjen orienterer sig langs med den for langsomt at overtage den.



Søjlediagrammerne viser fordelingen af henholdsvis lange og korte bakterier i en koloni i forhold til en ordensparameter, der siger noget om, hvordan de enkelte bakterier organiserer sig i forhold til hinanden. De lange bakterier orienterer sig ofte parallelt til sine nærmeste naboer (høj ordensparameter=orden), og de korte orienterer sig mindre i forhold til hinanden (uorden).



En skitse af en biofilm (eller bakteriekoloni) set fra oven.

andre lavet, og der kan de se, at hvis man kører forsøget over flere år, vil flere bakterier udvikle sig mod at være runde, mens der over tid vil være færre stavformede bakterier. I en biofilm er det omvendt,« forklarer Liselotte Jauffred.

Bakterier beskytter hinanden mod antibiotika

Liselotte Jauffred laver med sine kolleger også andre forsøg, der belyser betydningen af forskellige aspekter af fysiske forhold for bakteriers vækstmuligheder i en biofilm. Blandt andet laver forskerne forsøg, hvor de undersøger, hvad der sker, når forskellige bakterier maser til hinanden for at få mere plads, hvilket sker i alle biofilm. I starten vil bakterierne have rigeligt med vækstmuligheder, men i takt med at de nærmer sig hinanden, og pladsen bliver trang, skaber friktionen mellem bakterierne et fysisk stress inde i biofilmen. Dette kan lede til små udposninger eller rynker i biofilmstrukturen, og disse rynker har i sig selv betydning for de biologiske forhold i biofilmen, og hvad biofilmen som helhed kan og ikke kan.

En biofilm består heller ikke kun af bakterier, men også af forskellige molekyler, som de producerer. Forskerne laver også forsøg, hvor de genetisk manipulerer nogle bakterier til ikke at kunne producere disse molekyler, mens andre kan. Herefter undersøger de, hvad det betyder for de fysiske forhold inde i biofilmen, og hvordan det kan få nogle bakterier til at samarbejde

indledningsvist havde været flere eller færre af den ene eller anden bakterie. Forskningen viste, at det entydigt er en fordel for colibakterierne at være stavformede, når de skal leve i en biofilm. Det gjaldt både, når der var flere stavformede end runde bakterier til at starte med, og når der kun var ganske få stavformede bakterier fra begyndelsen af.

Liselotte Jauffred forklarer, at formen på bakterierne har betydning for, hvilke muligheder de enkelte colibakterier har. Er bakterierne stavformede, kan de lægge sig parallelt med hinanden som blyanter i et penalhus, og det kommer med nogle fordele i en biofilm. Når bakterierne er stavformede, bliver de skubbet sammen i nogle kanaler, og de kanaler bevæger sig ud mod periferien af biofilmen, hvor der både er mere plads og bedre adgang til næringsstoffer sammenlign-

net med midt inde i biofilmen, hvor der både er pladsmangel og kamp om de få ressourcer derinde. Når de stavformede bakterier når ud til periferien af biofilmen, overtager de det område af biofilmen med mest plads og bedst adgang til næring, og over tid betyder det, at de fuldstændigt overtager dominansen i biofilmen.

»Laver man genetiske undersøgelser, kan det være svært at identificere, hvorfor den ene bakterie har bedre muligheder for at vokse i en biofilm sammenlignet med den anden. Det omtalte forsøg er et eksempel på, hvordan mekanikken mellem bakterierne er den afgørende faktor. Det viser også, hvorfor man ikke altid kan sammenligne det, som sker i et reagensglas, med det, som sker i en biofilm. Lavede man det samme forsøg i et reagensglas, ville det være en fordel for bakterierne at være runde. Den slags forsøg har

for et fælles bedste. Endelig undersøger forskerne også, hvordan de fysiske forhold i en biofilm har betydning for antibiotikaresistens. Det er måske det område, hvor forskningen åbner sig mest i retning af at være brugbar og ikke blot grundforskning. Antibiotikaresistens er nemlig et stort problem i hele verden, og forestiller man sig som eksempel, at der på en pacemaker eller et implantat bliver skabt en biofilm med bakterier, er det rart at have viden om, hvordan de udvikler resistens, og hvad man kan gøre ved det.

Forskning indenfor emnet har indtil videre kortlagt, at nogle bakterier er ganske følsomme over for antibiotika, når de svømmer rundt i en væske i et reagensglas, men overhovedet ikke er det i en biofilm. I den sammenhæng spiller de fysiske forhold en stor rolle, for eksempel når andre bakterier skaber nogle lommer i biofilmen, hvor antibiotika slet ikke kan nå. Det betyder, at selv følsomme bakterier i disse lommer kan være fløjttende ligeglade med, hvad vi mennesker forsøger at slå dem ned med. Sker det på overfladen af en pacemaker, har vi et problem.

»Nogle bakterier skaber fysiske lommer, hvor antibiotika ikke kan komme hen, mens andre renser omgivelserne for antibiotika, så det ikke kan have en effekt. Begge dele er eksempler på, hvordan fysiske forhold har betydning for antibiotikaresistens. Faktisk kan man bedre tale om antibiotikatolerance i miljøet, end man kan tale om decideret resistens. Større viden indenfor dette område kan hjælpe os i retning af at forstå, hvordan vi kan slå bakterier i biofilm ihjel og gøre det med mindst mulig brug af antibiotika,« siger Liselotte Jauffred.

Kan give mere viden om kræft

Endelig er Liselotte Jauffred også interesseret i at forstå, hvordan de fysiske interaktioner mellem bakterier har betydning for genoverførslen mellem individer af samme art og individer af forskellige arter.

Liselotte Jauffred

Liselotte Jauffred er dansk fysiker og lektor i eksperimentel biofysik ved DTU Bioengineering ved Danmarks Tekniske Universitet. Hun leder Jauffred Lab, hvor hun undersøger, hvordan celler og mikrober organiserer sig og reagerer på fysiske påvirkninger. Gruppen kombinerer optisk manipulation, termoplasmonik og avanceret mikroskopi til at studere cellemembraners reparation, proteins bevægelser og kollektive fænomener fra bakteriesamfund til kræftcellers vækst og migration. Liselotte Jauffred har modtaget blandt andet Sapere Aude/Inge Lehmann-bevillinger og arbejder i krydsfeltet mellem fysik og biologi for at udvikle metoder og modeller, der forklarer, hvordan mekanik, genetik og tilfældighed former cellers adfærd.



Foto: Suste Bonné

Her har den fysiske og rumlige organisering af bakterierne i biofilmen betydning for, om bakterierne overhovedet er i nærheden af hinanden til at kunne dele gener. Ved genoverførsel kan der igen være tale om overførsel af gener med betydning for antibiotikaresistens, så kan forskningen få betydning for, hvordan man vil bekæmpe bakterier i biofilm i fremtiden.

Liselotte Jauffred fortæller, at forskningen også har relevans for forståelsen af, hvordan fysiske forhold er med til at danne ikke bare biofilm, men også andre flercellede strukturer. Det kan dreje

sig om flercellede bakteriekolonier, flercellede gærkolonier, flercellede planktonkolonier eller måske endda kræftsvulster, der også består af mange celler, som kæmper om den samme plads.

»Nogle af de fysiske mekanismer, som er til stede mellem individuelle bakterier i en bakteriekoloni, er også til stede mellem de individuelle celler i en kræftknode. Det er de samme fysiske kræfter, der er på spil, og derfor kan forståelsen af de fysiske kræfter mellem celler i en tæt bakteriekoloni gøre os klogere på biologi indenfor en helt masse områder,« siger hun. ■



Plastmoduler med et stort overfladeareal fremmer vækst af biofilm, hvilket for eksempel udnyttes til visse former for biologisk rensning. Foto: Shutterstock.

Videre læsning:

A. Sarlet, Anja K. Ehrmann, N. Mitarai, L. Jauffred: Wrinkles emerge from matrix complementarity in heterogeneous biofilms. doi.org/10.64898/2025.12.18.695073

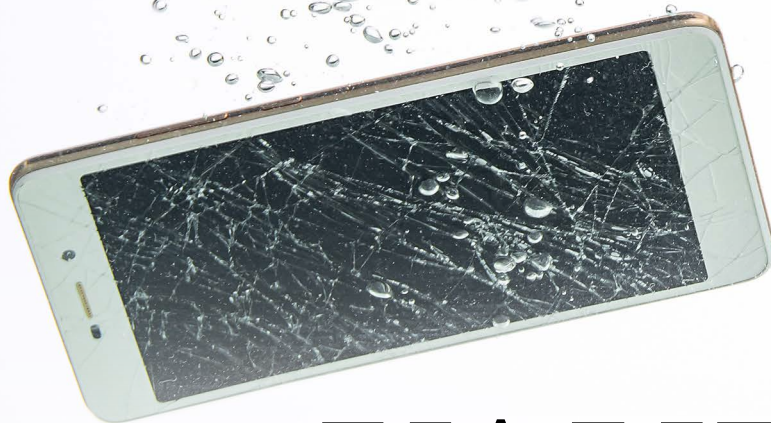
N. van den Berg, K. Thijssen, T. T. Nguyen, M. Cordero, A. García Vázquez, N. Mitarai, A. Doostmohammadi, L. Jauffred: Emergent collective alignment gives competitive advantage to longer cells during range expansion. Nature Communications (2025). doi.org/10.1038/s41467-025-67791-5d

Cordero, M., Mitarai, N. & Jauffred, L. Motility mediates satellite formation in confined biofilms. ISME J 17, 1819–1827 (2023).

Alba García Vázquez, Namiko Mitarai, Liselotte Jauffred, Genetic mixing and demixing on expanding spherical frontiers, ISME Communications, Volume 4, Issue 1, Jan. 2024, ycae009.



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



VAND:

glassets ven eller fjende?

Om forfatterne:



Elsebeth J. Pedersen er ph.d.-studerende, og forsker i at forstå reaktionen mellem glas og vand og dennes indflydelse på revnedannelse og glasstruktur. ejped@bio.aau.dk



Morten M. Smedskjær er professor, sektionsleder for Disordered Materials og leder af forskningsgruppen Glass Structure and Mechanics, der forsker i sammenhænge mellem atomar struktur og egenskaber af oxidglas-materialer. Han modtog sin ph.d.-grad i materialekemi i 2011 og arbejdede som forsker ved Corning Inc. fra 2011 til 2012. mos@bio.aau.dk

Begge ved Glass Structure and Mechanics Group, Institut for Kemi og Biovidenskab, Aalborg Universitet.

Glas er skrøbeligt og går let i stykker, når vi taber det. Derfor arbejder forskere på at udvikle nye metoder til at forbedre styrken af glas. Og muligvis kan man med noget så simpelt som vanddamp opnå samme effekt som med traditionelle metoder til hærkning af glas.

Glas er et helt uudværligt materiale i moderne teknologi og arkitektur. I bygninger bruges glas til alt fra energibesparende ruder til isoleringsfibre. I elektronik er glas en nøglekomponent i skærme til smartphones, tablets og fjernsyn. I medicinsk udstyr og laboratorier spiller glas en central rolle, fordi det er kemisk stabilt og let at rengøre. I den grønne omstilling bruges glas i både solceller og vindmøller.

Men jo mere vi integrerer glas i vores hverdag – og jo mere vi forventer, at det skal kunne holde til – desto vigtigere bliver dets styrke. Et tagvindue i et hus må ikke splintres ved haglvej. En mobilskærm skal kunne overleve et fald på fortovet. Og ville det ikke være rart, hvis bilruder blev stærke nok til at

modstå et stenslag? Derfor er forskningen i stærkere glas ikke bare et spørgsmål om komfort, men i særdeleshed også et spørgsmål om sikkerhed, funktionalitet og fremtidens teknologiske muligheder. Stærkere glas kan også gøres tyndere, hvilket vil mindske dets store CO₂-aftryk.

Den praktiske styrke af glas

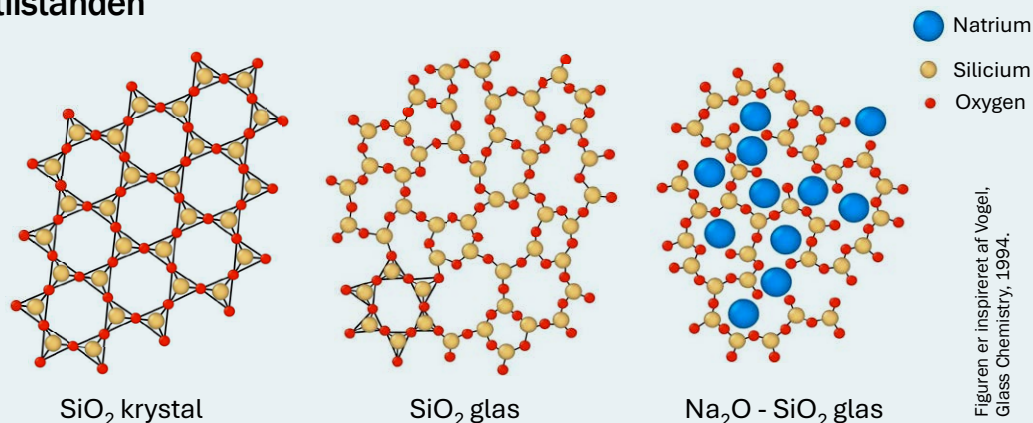
Når vi beskriver styrken af glas, skelner vi oftest mellem den teoretiske styrke og den praktiske styrke. "Rygraden" i glas består af et netværk af atomer, der er bundet sammen af kovalente bindinger (se boks). Disse bindinger er enormt stærke, hvilket betyder at der skal meget energi til at skille atomerne fra hinanden. Den teoretiske styrke af glas er baseret på netop den energi, der skal til for at skille atomerne ad, og derfor er den

meget høj for glas. Omvendt er den praktiske styrke forholdsvis lav. Det betyder, at der reelt ikke skal så stor en ydre kraft til at bryde disse bindinger og dermed få glasset til at revne og gå i stykker.

Årsagen til dette finder vi i glassets overflade. Her befinder sig et væld af mikroskopiske revner, som bliver skabt under produktion og håndtering, men som ofte er så små, at de ikke kan ses med det blotte øje. Når glasset får et hårdt slag, er det netop disse revner, som kraften fra slaget koncentrerer omkring, hvilket gør at bindingerne bliver brudt, og revnen vokser.

Når revnen når over en kritisk længde, vil den fortsætte med at vokse spontant, altså uden at vi tilføjer yderligere energi. Det sker,

Glastilstanden



Glasmaterialer dannes ved hurtig afkøling af en væske. Glas er altså ikke bare et materiale med én kemisk sammensætning, men kan bedre forstås som en tilstandsform. Alle materialer, der kan smeltes, kan således omdannes til glastilstanden, hvis de nedkøles hurtigt nok til at undgå krystallisering. Glas er derfor et fast stof, hvor atomerne er "frosset fast" i de samme positioner som i den forudgående væsketilstand. Hvor krystaller og metaller har en meget ordnet struktur med atomerne placeret på rad og række, er strukturen af glas derimod uordnet (amorf).

Figuren ovenfor viser denne forskel på krystal- og glasform samt en modificeret glasform for forbindelsen siliciumdioxid (SiO_2). En ordnet struktur er nemmere at beskrive, da vi for en perfekt krystal blot skal kende den såkaldte enhedscelle, altså kun en lille del af strukturen, før vi kan beskrive det hele. En uordnet struktur er derimod sværere at beskrive, da vi ikke har de samme gentagelser i strukturen – om end lokale områder i glasset godt kan have en krystallignende struktur, som det fremgår af figuren.

Det meste glas, vi møder i dagligdagen, er såkaldt silikatglas, der typisk fremstilles af kvartssand (silicium-

dioxid, SiO_2), soda (natriumkarbonat, Na_2CO_3) og kalk (calciumkarbonat, CaCO_3), samt mindre mængder magnesiumkarbonat (MgCO_3) og aluminiumoxid (Al_2O_3).

Når massen smeltes for at fremstille glas, omdannes karbonaterne til oxider under frigivelse af CO_2 (for eksempel $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2$), hvilket medvirker til den store CO_2 -udledning ved glasproduktion. I silikatglas udgør SiO_2 den såkaldte netværksdanner, der med sine kovalente oxygenbroer (Si-O-Si bindinger) danner et tredimensionelt netværk. Netværksdanneren er glassets "rygrad", fordi det nemt kan danne en glasstruktur alene, og derfor er det vigtigste element i glasset.

Na_2O , CaO og MgO er modifikatorer i glasset, som bryder de kovalente oxygenbroer og danner ionbindinger i glasstrukturen (for eksempel Si-O ... Na, som vist på figuren), hvilket sænker smeltetemperaturen. Langt de fleste elementer i det periodiske system kan indgå som modifikator i glas. Al_2O_3 er et såkaldt mellemstof, hvilket betyder at det kan indgå i glasset som både netværksdanner og modifikator, alt efter hvad resten af glasset består af. Det kan kun meget vanskeligt danne glas i sig selv, men kan indgå i glassets kovalente netværk, hvis der er modifikatorer til stede.

fordi energien, der skal til at danne en ny overflade, bliver mindre end den energi, vi frigiver ved at bryde glassets bindinger. Et eksempel, de fleste kender, er fra et stenslag på en bilrude, hvor det, der starter som et lille slag, over tid løber på tværs af hele ruden. Denne proces vil for de fleste glastyper blive forstærket af vand, da det "angriber" spidsen af glassets revne og sænker energien, der skal til at bryde de omkringliggende bindinger. Det kaldes stresskorrosion og betyder, at tilstedeværelsen af vand, oftest i form af

fugtighed i luften, sænker den kraft eller energi, der skal til for at få revnen til at vokse, og dermed sænker den praktiske styrke af glasset.

Derfor forskes der intenst i at øge den praktiske styrke af glas, blandt andet i vores forskningsgruppe på Aalborg Universitet.

Traditionelt gøres glas stærkere ved at efterbehandle det ved en såkaldt hærtningsproces (se boks på næste side). Denne hærtning skaber en spændingsprofil i glasset, hvilket

medfører at der skal mere kraft til at danne de mikroskopiske revner. Men hærtningen koster for både pengepung og miljø, da metoderne kræver høje temperaturer. De er dog nødvendige, da alternativet er værre; lavere praktisk styrke af glasset, og dermed glas der lettere går i stykker og skal udskiftes.

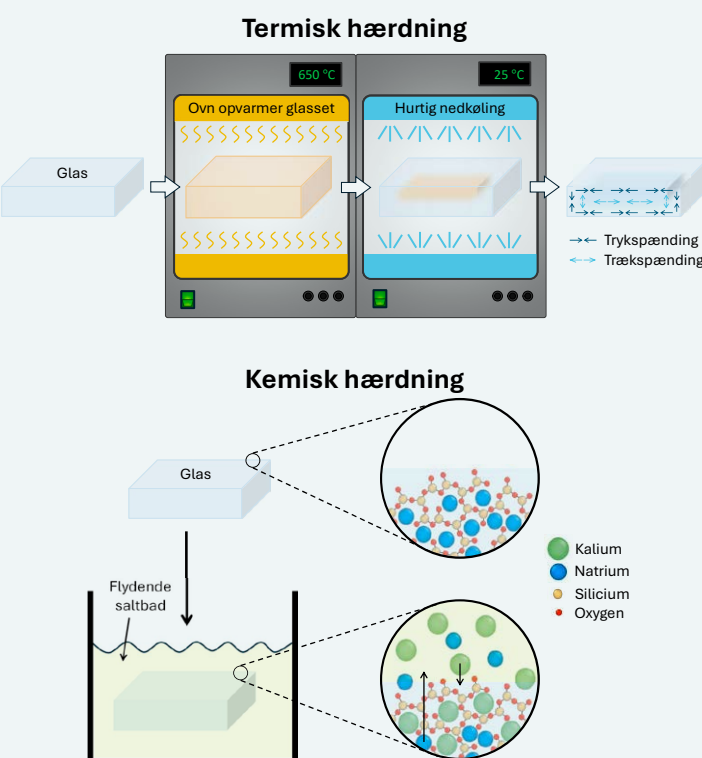
Selvhelende glas åbner for spændende spørgsmål

I 2019 opdagede vi på Aalborg Universitet sammen med vores samarbejdspartnere en ny glastype, der

Termisk og kemisk hærkning

Glas kan opnå en højere styrke ved termisk eller kemisk hærkning. Ved termisk hærkning opvarmes glasset (til omkring 650 °C for vinduesglas), hvorefter overfladerne nedkøles hurtigt. Dermed trækker overfladerne sig sammen hurtigere end glassets kerne, hvilket skaber en trykspænding i glassets overflade, som gør det vanskeligere at danne mikroskopiske revner.

Ved kemisk hærkning sænkes glasset ned i et flydende saltbad (for eksempel kaliumnitrat, KNO_3) ved en temperatur på omkring 400 °C. Den højere temperatur øger bevægeligheden af atomerne nok til, at natriumatomer i glassets struktur kan byttes ud med de større kaliumatomer i saltbadet, men uden at de stærkere bundne siliciumatomer bevæger sig. På grund af størrelsesforskellen af natrium- og kaliumatomer skabes der også ved denne behandling en trykspænding i glassets overflade. Kemisk hærkning skaber en kraftigere, men mindre dyb trykspænding i overfladen af glasset, og benyttes derfor typisk til tyndere glasstykker som telefonskærme, hvorimod større glasstykker såsom vinduer eller bilruder typisk hærdes termisk.



har rekordhøj praktisk styrke, fordi det er meget modstandsdygtigt overfor at danne revner, og som ovenikøbet har evnen til at hele sig selv, hvis man blot behandler glasset med vanddamp. Glasset har dog to væsentlige ulemper, nemlig at den kemiske holdbarhed er ekstremt lav, og at glasset indeholder et dyrt råstof (cæsiumoxid). Glasset kan derfor i sig selv ikke bruges til kommercielle formål.

Opdagelsen åbnede dog op for en række spændende spørgsmål. For hvad er årsagen til, at lige præcis denne type glas reagerer sådan med vanddamp? Og hvad vil der ske, hvis vi udsætter andre glasstyper for den samme behandling? Med disse spørgsmål begyndte vores rejse på at udvikle et glas, der havde samme positive effekt ved reaktion med vand, men med markant højere kemisk holdbarhed. Det har vi gjort gennem et forskningsprojekt finansieret af Danmarks Frie Forskningsfond.

Når vi fremstiller "et nyt glas", betyder det, at vi har smeltet et glas med en specifik kemisk sammen-

sætning. For selvom vinduesglas har bestået af de samme tre primære råstoffer i flere århundreder, så kan langt de fleste elementer i det periodiske system faktisk indgå i en glaskomposition. Det er derfor ikke så ligetil at designe nye glas, da mulighederne er enorme.

Det teoretiske antal mulige glaskompositioner, vi kan lave, er vurderet til 10 oktilliarder (10^{52}). Det gigantiske tal fremkommer, fordi vi kan tilføje så mange forskellige elementer fra det periodiske system, og fordi vi kan blande dem i et væld af sammensætninger. Af denne grund er udviklingen af nye glastyper i høj grad en "trial and error" proces, hvor man i en gentagen proces justerer lidt på sammensætningen, tester egenskaberne, justerer osv.

Nye lovende glaskompositioner

Vores forskning har vist, at komponenter som boroxid (B_2O_3), aluminiumoxid (Al_2O_3) og fosforoxid (P_2O_5), der alle kan indgå i de kovalente bindinger, der udgør glassets ryggrad, er essentielle at have (én

eller flere af) i glasset for at opnå en positiv effekt af vandbehandlingen. Hvis man kombinerer det med en større alkali-ion, for eksempel kalium, øger det igen sandsynligheden for en positiv effekt. Men det er ikke uden udfordringer at ændre glassets sammensætning. Der er risiko for, at der dannes krystaller, og/eller at den smeltede masse deler sig i flere faser – i lighed med, når man blander vand og olie. Det fører til en række nye problemer, når den smeltede masse køles og bliver til glas.

På trods af disse udfordringer er det lykkedes os at udvikle flere glaskompositioner, der kombinerer relativ høj kemisk holdbarhed med positiv effekt af vandbehandlingen. Den positive effekt ses ved, at glasset bliver mere modstandsdygtigt overfor revner, og at de skader, der faktisk findes i glasset, bliver mindre efter kontakt med vanddamp, altså en form for selvhealing.

Vores forskning viser altså, at når vand bruges rigtigt, og på den rigtige glaskomposition, kan det bruges til at styrke glas.

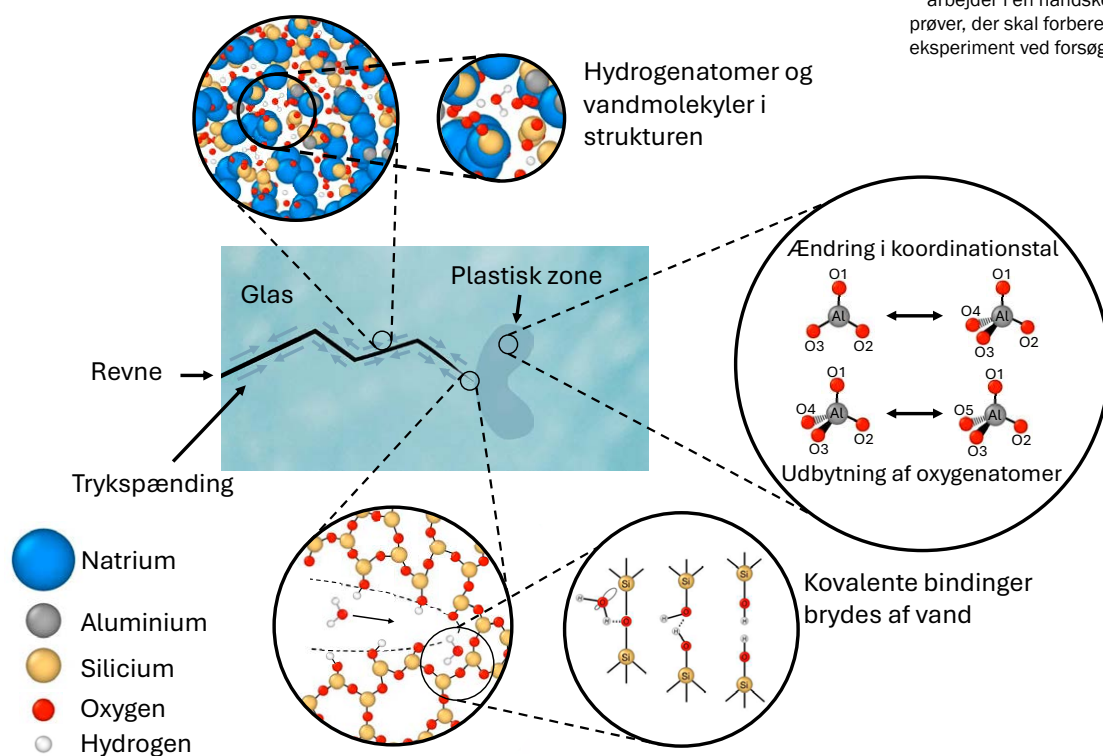
Selve vandbehandlingen er meget simpel. Ønsker vi en mild behandling af glasset, foregår det i et klimaskab hvor temperatur (typisk 25-80 °C) og relativ fugtighed (typisk 40-80%) kan indstilles præcist. Det er derfor vanddampen i luften af kammeret, der reagerer med glasset. Ønsker vi en mere ekstrem behandling, bruger vi en autoklave, hvor vanddampen også skaber et tryk omkring prøven. Her behandler vi typisk ved 105-140 °C ved 100% relativ fugtighed. Den mildere behandling i klimaskabet kræver typisk en længere behandlingstid på mindst 24 timer, mens behandling i autoklave typisk er på maksimalt 24 timer, og helt ned til ½ time.

Fra laboratoriet til produktion

Udover forskningen på universiteter arbejder den amerikanske glasproducent Corning Inc. også på metoden. Corning Inc. er verdens førende producent af specialglas til blandt andet mobiltelefoner og optiske fibre. De har vist, at deres udviklede glaskompositioner danner trykspændinger i overfladen efter behandling med vanddamp. Denne spændingsprofil minder om den, der dannes ved kemisk



Elsbeth J. Pedersen og Anders K. R. Christensen arbejder i en handskeboks med vandfølsomme prøver, der skal forberedes til neutronsprekingseksperiment ved forsøgsreaktoren ISIS i England. Foto: Morten M. Smedskjær

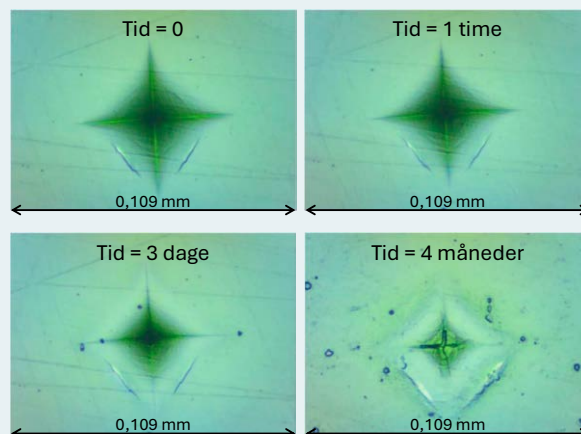


Vanddamp kan reagere med glasset på flere måder omkring en revne – nogle af disse reaktioner bremser revnen fra at dannes, mens andre får revnen til at vokse yderligere. I overfladen vil hele vandmolekyler kunne trænge ind i glasstrukturen og eventuelt reagere med atomerne i glassets struktur, hvilket medvirker til en øget trykspænding i overfladen, der kan bremse revnedannelse. Vandet kan også bryde de kovalente bindinger i glassets ryggrad omkring revnen, hvilket får revnen til at vokse. Slutteligt kan vand bidrage til dannelsen af en plastisk zone omkring spidsen af revnen. Det sker, fordi hydrogenatomer fra vandet øger sandsynligheden for, at visse atomer ændrer koordinationsstal, samt at de nærmeste oxygenatomer kan bytte rundt. Denne plasticitet gør strukturen mere stabil omkring revnespidsen, så der skal en større påført kraft til at bryde bindinger og få revnen til at vokse.

Eksperimentelle metoder

Hvordan undersøger man, hvor meget kraft der skal til, før der dannes overfladerrevner i glas? Eller hvordan glassets struktur ændrer sig, når vi behandler glasset med vand? Det kræver selvsagt forskellige eksperimentelle metoder. Meget af dette udstyr har vi selv til rådighed i laboratoriet, for eksempel en indenter, også kendt som en hårdhedsmåler. En indenter laver små (mikroskopiske) aftryk i glasset med en diamantspids. Ved efterfølgende at undersøge størrelsen og formen af disse aftryk, kan vi bestemme, hvor hårdt glasset er, samt hvor stor kraft der skal til, før glasset revner. Vi kan også se på mærkerne før og efter en behandling, for at undersøge om behandlingen har gjort dem mindre.

Der kan ofte også være behov for større og dyrere udstyr, end vi selv har til rådighed i laboratoriet. Det kan være en røntgen- eller neutronlinje til at karakterisere glassets struktur, dvs. hvordan atomerne sidder i strukturen. Med dette udstyr kan vi for eksempel måle, hvor mange oxygenatomer der sidder rundt om netværksdanneren (koordinationsstal), eller hvor stor afstand der er mellem forskellige atomer i glasset (bindingslængde). Ved behandling med vanddamp undersøger vi for eksempel, hvor mange og hvilke atomer der ændrer koordinationsstal som følge af behandlingen, da mange ændringer betyder en mere "fleksibel" struktur. Ændringer i bindingslængder kan give os information om, hvordan vandet binder til glasnetværket – altså hvor godt det "sidder fast", eller hvor let det er at fjerne igen. Det er meget informativt, da vandet gerne skal blive i strukturen for at bibeholde den positive effekt af behandlingen, og ikke dampe af ved små stigninger i temperaturen, for eksempel hvis solen skinner på glasset.



Mikroskopi-billeder af mekanisk aftryk lavet i et cæsium-aluminoborat-glas. Glasset er behandlet efter indentering ved stuetemperatur og 40% relativ fugtighed i forskellige tidsintervaller.

Kilde: Januchta K. et al, *Advanced Science*.



Elsebeth J. Pedersen i gang med at indsætte prøver til neutronspretningseksperiment ved forsøgsreaktoren ISIS i England.

Foto: Anders K. R. Christensen

Kilder

Wiederhorn S.M., and Bolz L.H., Stress Corrosion and Static Fatigue of Glass. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1970, 53, 543-548.

Januchta K., Stepniewska M., Jensen L.R., Zhang Y., Somers M.A.J., Bauchy M., Yue Y.Z., Smedskjaer M.M., Breaking the Limit of Micro-Ductility in Oxide Glasses. *Adv. Sci.*, 2019, 6, 1901281.

Gross T.M., Wu J., Aaldenberg E.M., Zheng Z., Sarafian A.R., Jones J.A., Dimond T.E., Glass with hydration-induced compressive stress profiles. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2021, 1-9.

Gross T.M., Sarafian A.R., Wu J., Zheng Z., inventor; Corning Incorporated, assignee. Glass Compositions and Methods for Strengthening Via Steam Treatment. US 12,234,182 B2, 2025 Feb 25.

Videre læsning

Lin Y.-T., Naghashnejad M., Zoba A.N., Ogrinc A.L., Wilkinson C.J., Link M.M., Guo Y., Mauro J.C., Kim S.H., Glass-water interactions: From surface into the bulk. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2025, 108, e70137.

hærdning (se boksen: Termisk og kemisk hærdning), blot med en lidt lavere styrke. Hvordan vandet danner denne spændingsprofil ved vi stadig ikke med sikkerhed, men vi ved, at det medvirker til den øgede brudstyrke af disse glas. Corning Inc. har patenteret dele af denne forskning, og ved en international glaskonference i foråret 2025 løftede de sløret for, at de arbejder intensivt på at kunne frigive et glasprodukt, der er efterbehandlet med vanddamp.

Dette er banebrydende på flere områder, mest af alt fordi vandbe-

handlingen er langt mere klimavenlig end den kemiske hærdning, da temperaturen er lavere, og vand er det eneste råmateriale. Men ifølge vores forskning også fordi glasset kan reagere med fugt fra luften efter behandlingen. Når behandlingen laves, øges temperaturen, og eventuelt også trykket, for at fremskynde processen, men reaktionen kan også ske ved langt lavere temperaturer, blot langsommere.

For nogle glastyper betyder det, at glasset gradvist vil blive stærkere blot ved at ligge på for eksempel

skrivebordet ved siden af os. Og ikke nok med det: Revner og ridser i overfladen vil være mere modtagelige overfor denne reaktion – både de mikroskopiske revner, der opstod under produktionen, og de ridser, der siden er kommet til ved brug, for eksempel af vores mobiltelefon. Det kan betyde, at de svageste punkter i glasset kan forstærkes blot ved at reagere med fugtigheden i luften omkring os.

Hvis vi blot designer den rigtige glaskomposition, kan vand altså sagtens være glassets ven – selv, når det sidder på en mobiltelefon. ■

TIP DINE ELEVER OM STUDERENDE FOR EN DAG

‘Studerende for en dag’ giver dine elever en unik mulighed for at blive klogere på hverdagen som studerende på Aarhus Universitets **naturvidenskabelige uddannelser** og **ingeniøruddannelser**.

De kan **opleve studielivet, komme med til undervisning** og **stille spørgsmål** direkte til den universitetsstuderende, de følges med.



Fotografer: Anders Trærup og Lars Kruse, AU Foto

Læs mere og se tilmeldingen på

NAT.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG

TECH.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG

KAN EN LILLE ORM HJÆLPE MED PRODUKTIONEN AF FISK?

Om forfatterne



Dennis Grantland er biolog, akademisk medarbejder på Ecoscience ved Aarhus Universitet. Forsker i økofysiologi hos dværgregnørme og laksefisk. grantland@ecos.au.dk



Martin Holmstrup er professor på Ecoscience ved Aarhus Universitet. Han forsker i jordlevende organismers økofysiologi. martin.holmstrup@ecos.au.dk



Niels Lorenzen er professor ved DTU Aqua. Han forsker i vacciner til fisk og fiske-immunologi. nilo@aqu.dtu.dk



Stine Slotsbo er seniorforsker ved Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet. Hun forsker i økofysiologi og økotoxikologi hos jordlevende organismer. stsl@ecos.au.dk

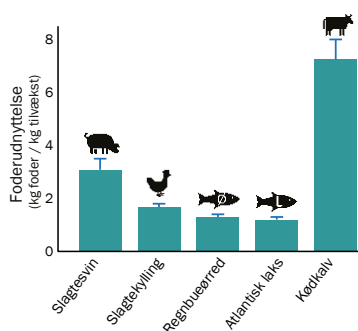


Foto: Fishlab.

En art af såkaldte dværgregnørme (enkytræer) kan blive fremtidens fiskefoder. Fiskeyngel viser nemlig bedre vækst og overlevelse på en kost af disse orme. Derudover kan ormene muligvis også bruges til at give fiskene vaccine og dermed nedsætte forbruget af antibiotika i fiskeproduktionen.

I en verden med klima- og miljøudfordringer er det svært at regne ud, hvordan vi bedst brødføder den stigende verdensbefolkning. Vi skal spise flere planter, mindre kød, eller finde nye alternativer. De seneste ti år har medierne jævnligt bragt historier om, at nu skal vi spise insekter for at skåne klimaet. Det ser bare ikke ud til, at vi kommer til at opgive frikadeller og flæskesteg lige foreløbigt. Kun omkring 3% af Danmarks befolkningen lever udelukkende vegetarisk eller vegansk ifølge en analyse fra DVF og Coop Analyse i 2024. Hvilke muligheder har vi så tilbage?

Vi kan godt lide at spise fisk! Men mange af verdens vilde fiskebestande er i tilbagegang. Det er en væsentlig årsag til, at akvakultur, altså



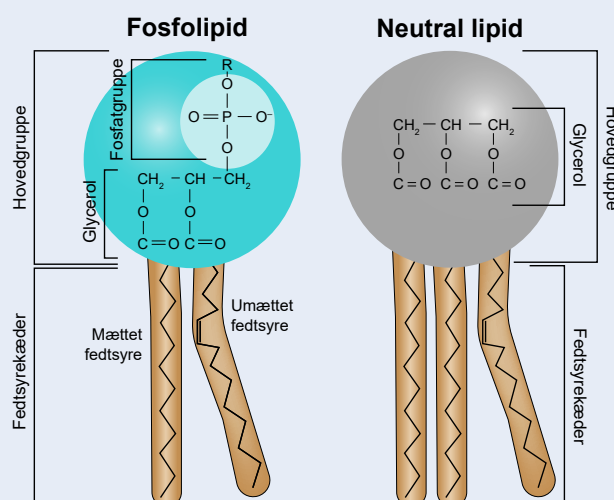
Figuren viser foderudnyttelsen for forskellige produktionsdyr. Figuren er baseret på tal fra Seges, FAO og USDA.

produktion af fisk i dambrug og havbrug, er den hurtigst voksende animalske fødevareresektor globalt. Fordelene ved akvakultur er blandt andet, at man kan producere fisk vertikalt og dermed udnytte arealet optimalt. Desuden er fisk generelt ektoterme (dvs. vekselvarme), hvilket betyder at de ikke bruger energi på at opretholde en konstant kropstemperatur. De bruger også relativt lidt energi på bevægelse, fordi vandet modvirker tyngdekraften. Faktisk kan en god produktion af regenbueørred og laks blive så effektiv, at 1,1 kilo tørfoder giver en øgning på 1 kilo fisk. Til sammenligning skal der omkring 3 kilo foder

Fedtsyrer og fiskeopdræt

Fedtsyrer, der indgår som byggesten i kroppen – blandt andet i cellemembraner, nervesystemet og som signalstoffer, er primært fosfolipider. De består af en hydrofil hovedgruppe, som er bundet gennem en fosfatgruppe til et simpelt glycerollipid med to hydrofobe fedtsyrer. Dog kender de fleste af os nok bedst fedtsyrer som den energireserve, der samler sig på mave og lår efter jul eller en god ferie, hvor vi har spist mere, end vi har forbrændt. Denne type fedtsyrer er neutrallipider, og de består primært af triglycerider. Fedtsyrer klassificeres på forskellige måder, men ofte taler vi om mættede, monumættede og polyumættede fedtsyrer, alt efter hvor mange dobbeltbindinger der er i carbonkæderne. Det er især de polyumættede fedtsyrer, som har stor betydning for sundhed og udvikling, og nogle af disse kaldes *essentielle fedtsyrer*. Disse kan kroppen ikke selv lave, og derfor skal vi have dem igennem kosten. Specielt omega-3 fedtsyrerne ALA (α -linolensyre), EPA (eicosapentaensyre) og DHA (docosahexaensyre) er vigtige at spise.

Når vi vil forstå fiskenes fedtsyrebehov, kan vi i grove træk opdele dem i ferskvandsfisk og marine fisk. Marine fiskearter som pighvar eller torsk kan ikke selv danne DHA og EPA, da de ikke evolutionært har haft et behov for at gøre dette. Det er naturligt kommet op igennem fødekæden fra marine alger, som producerer



store mængder af omega-3 fedtsyrerne. Ferskvandsalger producerer også essentielle fedtsyrer, men i langt mindre grad EPA og DHA. Derfor har ferskvandsfisk (og fisk som regnbueørreder, der både kan leve i fersk- og saltvand) evolutionært udviklet evnen til selv at danne en større andel af disse. Det sker primært ved, at nogle enzymer kan modificere andre fedtsyrer, som forekommer hyppigt i ferskvandsalgerne. Dog er omdannelsen til EPA og DHA ikke altid tilstrækkelig, og kan især være en udfordring i de helt tidlige livsstadier.

til et ekstra kilo gris og en del mere for kvæg.

Akvakultur har dog også sine udfordringer, og dem hører vi ofte om. Der bliver udledt plantenæringsstof som N-forbindelser, og der bliver, som i andre dyreproduktioner, brugt antibiotika til behandling af sygdomme. En vigtig ingrediens i fiskefoder er fisk. Ja, du læste rigtigt, for på trods af at fiskebestandene i verdenshavene er pressede, bruges fiskemel og fiskeolie fra vildt-fangede fisk fortsat i foderet. Det har nemlig den helt rigtige næringsstofsammensætning og er en kilde til omega-3 fedtsyrer, som er vigtige for vækst og sundhed, og er vanskelige helt at erstatte med vegetabiliske ingredienser.

Dværgregnorm med lovende egenskaber

I vores projekt kan vi ikke løse alle problemerne, men den lille dværgregnorm (*Enchytraeus albidus*) har

potentiale til at gøre en stor forskel som foder for fisk i de vigtige tidlige livsstadier. Ormen kan fremme dyresundheden i dansk akvakultur, nedsætte antibiotikaforbruget, og gøre det meget mindre besværligt at være økologisk fiskeopdrætter i Danmark.

Lige nu findes der ingen vaccine mod yngeldødelighedssyndrom (YDS), en bakterieinfektion, som mange fiskeproducenter oplever problemer med, og derfor må fiskene behandles med antibiotika. Det håber vi at kunne løse ved at bruge ormen til at give vaccinen til fisken. I denne artikel er vores fokus at belyse, om ormen er egnet som regnbueørrefoder, og hvordan det påvirker fiskens vækst og sundhed.

For at dværgregnormen kan bruges som foder og til at give vaccinen til regnbueørreder, er det først og fremmest nødvendigt, at ormen kan

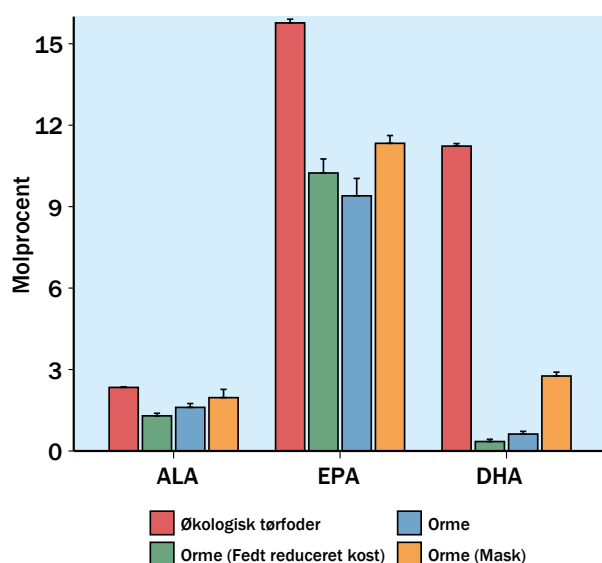
produceres i store mængder. Det har længe været kendt, at dværgregnormen forholdsvis nemt kan produceres i kulturer. I det tidligere Sovjetunionen blev der på nogle anlæg produceret op til flere tons orme om året. I nyere tid har virksomheden Fishlab også påvist, at større produktion kan lade sig gøre. Naturligvis handler det ikke kun om mængder, det er også vigtigt, at ormen dækker fiskens behov for at sikre god og sund vækst. Ligesom for alle andre organismer er der forskel fra fiskeart til fiskeart på deres specifikke næringsbehov, men overordnet passer ormens næringsprofil godt til regnbueørredernes behov. Det er kun ormens lave mængde af den essentielle omega-3 fedtsyre DHA, som kan bekymre.

På trods af, at man som biologistuderende lærer, at omega-3 fedtsyrer kommer fra mikroalger i havene, og at de derfra bevæger

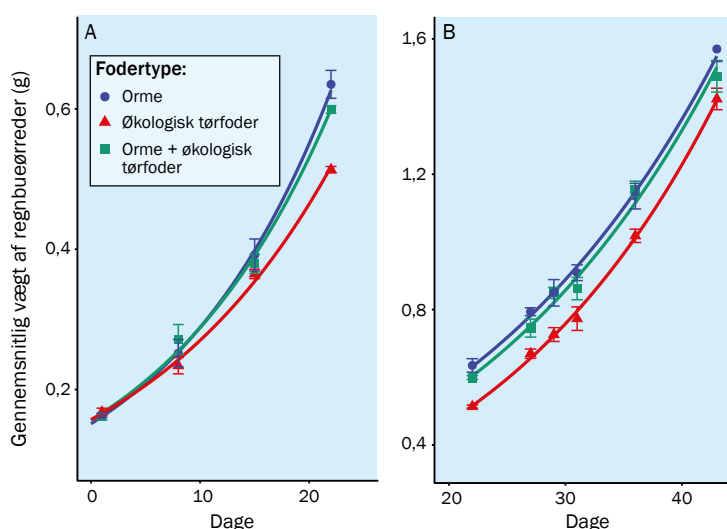
Forsøgsdesign

For at undersøge, om ormen er egnet som foder til regnbueørreder, er det vigtigt at have designet et robust fodringsforsøg.

Vi opsatte et system, som cirkulerede vand mellem 15 fisketanke for at skabe ens forhold for alle fisk. Vi startede med 50 fisk i hver tank og tildelte hver tank tilfældigt en af de tre behandlinger: økologisk tørfoder (fiskefoder til ørreder baseret på fiskemel), orme eller en kombination af økologisk tørfoder og orme. Vi havde fem tanke af hver type behandling (fem replikater), og de fik deres forskellige foderbehandlinger i 3 uger efterfulgt af 3 uger, hvor alle ørreder blev fodret med økologisk tørfoder. Under forsøget blev fiskene fodret *ad libitum* (efter appetit), og der blev løbende registreret dødelighed samt foretaget målinger af længde, vægt, levervægt, finneskader og fedtsyresammensætning af både hele fisk og øjne og hjerne.



Figuren viser indholdet af de essentielle omega-3 fedtsyrer (ALA, EPA og DHA) i molprocent i forskellige fodertyper: Økologisk tørfoder, orme som er fodret med havregryn, orme som er fodret med fedtreduceret havregryn, og orme som er fodret med restproduktet mask. Molprocent angiver, hvor stor en procentdel af det samlede antal fedtsyre-molekyler i tørfoder/orme, de tre essentielle fedtsyre typer udgør.



Graferne viser vækstkurver for regnbueørreder, som er fodret med enten orme, økologisk tørfoder eller en kombination af orme og økologisk tørfoder i 3 uger (A), hvorefter de samme tre grupper ørreder er fodret i 3 uger med økologisk tørfoder alene (B).

sig op igennem fødekæden, er det ikke nødvendigvis hele sandheden. Forskning viser, at flere invertebrater (dyr uden rygsøjle), som blæksprutter og børsteorme, har enzymerne til at danne omega-3 fedtsyrer, og meget tyder på, at dværgregnormen i nogen grad også har denne evne. Men den indeholder dog som nævnt kun meget lidt DHA. Derfor er det næsten lige så interessant, at man gennem ormens kost kan manipulere ormens fedtsyreprofil. For eksempel kan restproduktet mask fra ølproduktion anvendes som orme-foder og derved øge DHA-indholdet i ormen. Det giver muligheden for bæredygtigt at tilpasse ormens fedtsyreprofil, så den matcher fiskens behov.

Hvordan påvirker ormene regnbueørrederne?

I opdræt af marine fiskearter er det ofte udfordrende at finde en passende startføde, når fiskeynglen ikke har mere blommesæk og begynder at spise. Fiskenes fordøjelseskana er på dette tidspunkt ikke færdigudviklet, så de kan ikke fordøje tørfoder, og der er store udfordringer med dødelighed. Forsøg med fladfisk viser, at dværgregnormen har en positiv effekt på vækst og overlevelse i disse helt tidlige livsstadier.

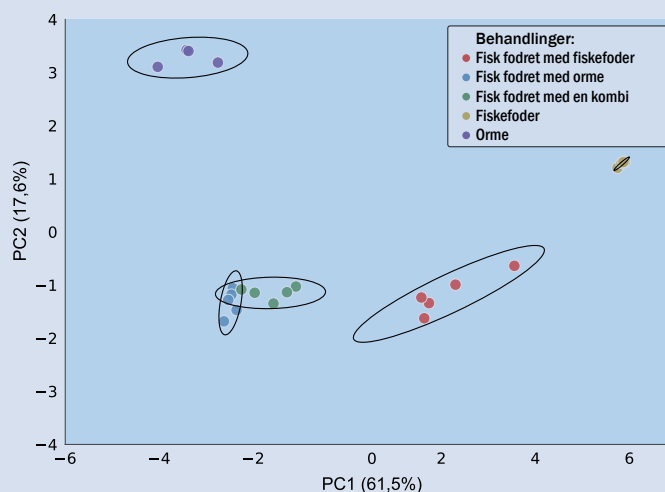
Takket være en større blommesæk er regnbueørreders fordøjelseskana mere færdigudviklet, når de begynder at få foder. De er i stand til at spise og vokse på tørfoder, og vi forventede derfor ikke nødvendigvis, at fiskene ville klare sig bedre, når de fik orme. I vores forsøg med regnbueørred viste det sig imidlertid, at regnbueørrederne voksede hurtigere, når de blev fodret med dværgregnormen, end når de fik økologisk tørfoder. Det er svært at sige, om ormen smagte bedre, om de levende orm fik fiskene til at spise mere, eller om det har noget at gøre med forskellen i fordøjeligheden af de to typer foder. I forhold til regnbueørredernes sundhed var der ikke nogen forskelle mellem behandlingerne.



Foto: Fishlab.

Analyse af lipider sladrer om fiskenes kost

For at undersøge, hvordan de forskellige fodertyper påvirker regnbueørredernes fedtsyresammensætning, har vi lavet en såkaldt Principal Component Analyses (PCA) af de neutrale lipider i fiskens muskelvæv. En PCA er en metode til at forenkle komplekse data. Det vil sige, at i stedet for at vise alle de 18 forskellige fedtsyrer, vi har målt, samler PCA dem i to nye akser, PC1 og PC2, som opfanger den største del af den variation, der er i fedtsyresammensætningen mellem fiskene (og foderet). Denne analyse afslører, at fisk, som er blevet fodret med en kombination af orme og økologisk tørfoder (grøn), har spist begge dele, men at de minder mere om dem, der kun har spist orme (blå). Det kan du se i de to behandlings tætte placering, selvom fiskene som fik en kombination, også er spredt lidt i retning af dem, der kun har fået økologisk tørfoder (rød). Faktisk ligger fedtsyrerne fra de fisk, som har spist en kombination, så tæt på de fisk, som kun har spist orme, at der ikke er nogen statistisk signifikant forskel på de to grupper.



Ellipserne omkring punkterne illustrerer 95%-konfidensinterval. PC1 beskriver 61,5% af variationen, og PC2 17,6%. Det vil sige, at PC1 (x-aksen) forklarer størstedelen af forskellene i behandlingerne.

Når de sundhedsmæssige forhold ikke var forskellige, og fiskene klarede sig fint, indikerer det, at det lave indhold af DHA i ormen er tilstrækkeligt til at dække regnbueørredens behov. Som du kan læse i faktaboksen om fedtsyrer, deler

vi fedtstofferne op i to forskellige slags – fosfolipider og neutrallipider. Neutrallipider betegnes almindeligvis som oplagringsfedt, og de følger derfor groft sagt det gamle udtryk “Du er hvad du spiser”. Så hvis fiskene er blevet fodret med en

kombination af orme og økologisk tørfoder, og de spiser lige meget af begge dele, burde fedtsyresammensætningen i fiskene ligne en blanding af de to typer foder. Da vi analyserede fiskenes fedtsyreprofiler, faldt vi over noget interessant.



Foto: Fishlab.

Yderligere læsning
Holmstrup, M. E., Gadeberg, S. F., Engell-Sørensen, K., Slotsbo, S., & Holmstrup, M. (2022). A new strategy in rearing of European flounder: using live *Enchytraeus albidus* to enhance juvenile growth. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(11), 1333-1341. doi:10.3920/jiff2021.0106

FAO. 2024. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action*. Rome. doi.org/10.4060/cd0683en

Grantland, D., Holmstrup, M., Overgaard, J., Holmstrup, M. E., Slotsbo, Stine. (2025). Tiny Worms, Big Potential: *Enchytraeus albidus* (Annelida: Clitellata) as Starter Feed for Rainbow Trout. *Aquaculture Research*. DOI:10.1155/are/7339644.

Tocher, D. R. 2010. Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish. *Aquaculture Research*, 41, 717–732. doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.02150.x

Udover forfatterne er følgende samarbejdspartnere involveret i projektet: Fishlab.dk
Ådal Ørred
DTU Aqua
Projektet er støttet af ICROFS under Grøn Vækst og Udviklingsprogram (GUDP).

Her tegnede der sig et billede af, at ørrederne faktisk havde en klar præference for de levende orme. Fedtsyresammensætningen hos de fisk, der havde fået en blanding af orme og økologisk tørfoder de første tre uger, lignede nemlig meget mere den i fisk, som kun havde fået orme, end i fisk, som kun havde fået tørfoder. Det kan virke logisk, at en vrikkende orm er mere tiltalende for en fisk, men man kunne også have antaget, at det kalorietætte foder med en større andel af de lækre vigtige omega-3 fedtsyrer, designet til at vække fiskenes ap-

petit, ville være regnbueørredernes fortrukne føde.

Næste skridt: vaccination med orme

En vaccine består typisk af dræbte bakterier, og udfordringen med at vaccinere regnbueørreder mod YDS, er at det skal ske meget tidligt i deres liv. Det er blandt andet en udfordring at sikre, at fiskene modtager en tilstrækkelig mængde vaccine. Derfor arbejder vi i projektet på at bruge ormene som levende vektorer, der kan levere vaccinen ved at fiskene spiser dem. Forenklet fore-

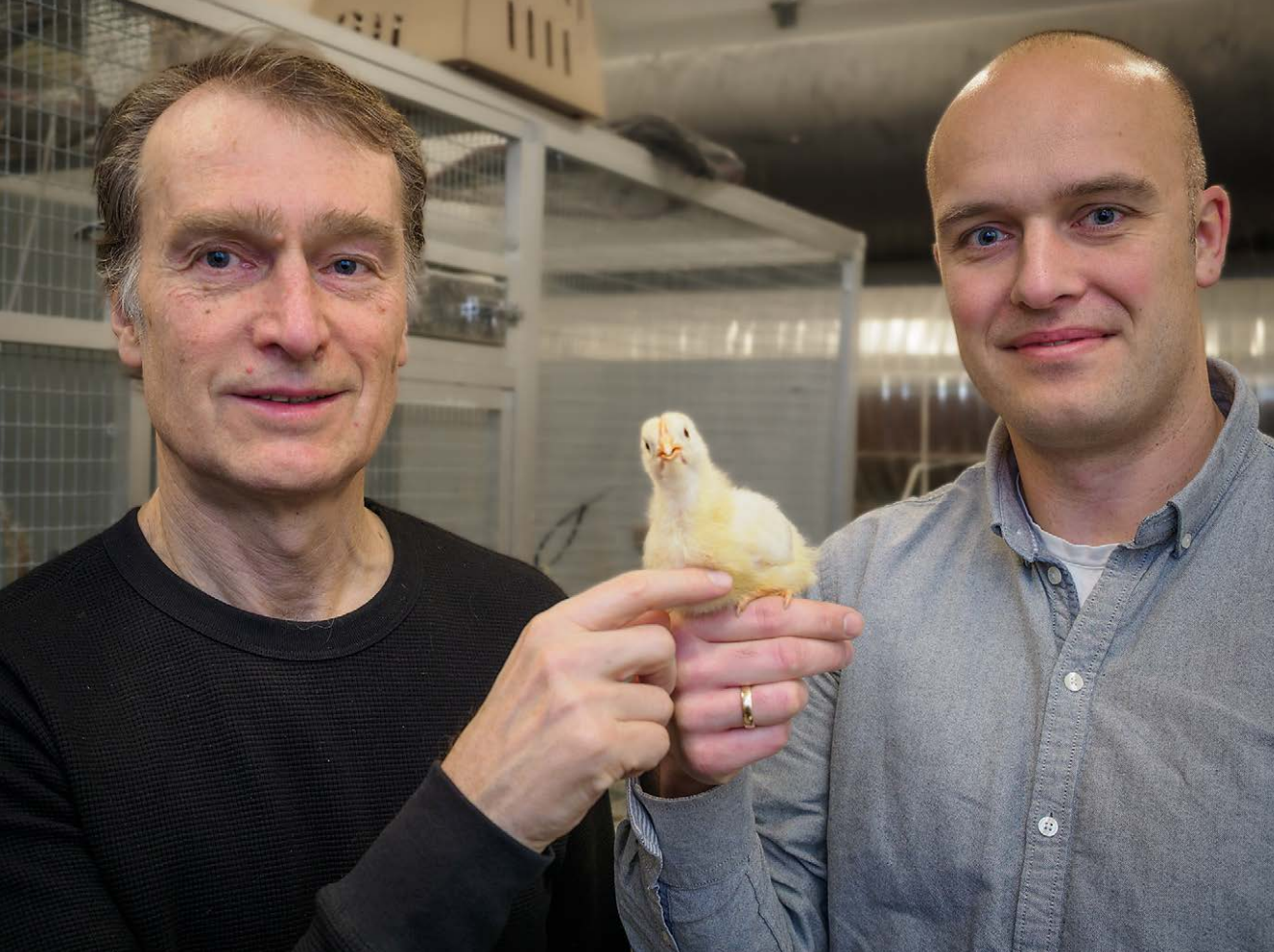
går det således, at vi fodrer ormene med dræbte YDS-bakterier, så deres tarm er fyldt, og der er tilstrækkeligt med antigener til stede til effektivt at sætte gang i fiskens immunsystem. Det skal selvfølgelig testes ved først at undersøge, om ormene spiser og optager bakterierne, og herefter, om det igangsætter den ønskede immunrespons hos fiskene. Det lyder nemt og lavpraktisk, men i virkeligheden bliver det hurtigt komplekst. Det er nemlig ikke nok, at ormene bærer vaccinen. For at vaccinen kan virke effektivt, skal den rette dosis og evt. behov for hjælpestoffer kendes, så der aktiveres et beskyttende immunrespons.

At bruge små jordlevende orme som "vaccinebudbringere" til fisk lyder måske som science fiction, men vores forsøg tyder på, at idéen faktisk kan lade sig gøre. Det kræver naturligvis en del finjustering og forsøg, som vi er godt i gang med. Vi har allerede vist, at ormene kan optage indholdet og levere det videre til det rette sted i fiskens tarm. Til disse forsøg anvender vi dog ikke en vaccine, men i stedet gærceller med en lysende markør, så vi kan følge leveringen trin for trin. Næste skridt bliver nu at undersøge, om vaccinen kan beskytte fiskene mod sygdommen YDS i kontrollerede laboratorieforsøg. Hvis alt går som håbet, kan vi i løbet af 2026 give et klart svar på, om denne utraditionelle metode kan blive en ny vej til sunde fisk i akvakulturen. ■

Antibiotika og fiskevaccination i dansk akvakultur

Dansk akvakultur står for 2,1% af det samlede antibiotikaforbrug i dyreproduktion. Det svarer til 1800 kg/år. Sygdomme kan medføre store tab, og behandling er derfor nødvendig, men gentagne antibiotikabehandlinger er u hensigtsmæssige for både dyrevelfærd og resistensudvikling. I økologisk akvakultur er reglerne særligt stramme, og der må kun behandles få gange med antibiotika. Overskrides dette, mister fiskeproducenten sin økologiske status. Der er altså et stort behov for en YDS-vaccine for at nedsætte brugen af antibiotika generelt, men også for at gøre det nemmere at være økologisk producent. Lige nu er der kun én økologisk producent i Danmark (Ådal Ørred).

Der anvendes i dag primært to metoder til vaccination af regnbueørreder. Den første er dypvaccination, hvor fiskene fra de er omkring 5 gram nedsænkes i en vandig opslæmning af dræbte bakterier, og den anden er stikvaccination, hvor hver enkelt fisk bedøves og får et stik med vaccine. Dypvaccination fungerer kun for nogle få vacciner, og effekten er kortvarig. Stikvaccination giver ofte god og langvarig beskyttelse, men er hverken velegnet eller rentabel til små fisk. Derfor er der stadig behov for en mindre invasiv og effektiv metode til at vaccinere fiskene, når de er små.



Lektor Christian Damsgaard (til højre) og professor Jens Randel Nyengaard. Flere end 20 andre danske og tyske forskere fra en bred vifte af discipliner har også bidraget til studiet. Kyllingen i midten af billedet var ikke selv involveret i studiet, men nogle af dens artsfæller var – som modelorganismer sammen med zebrafiske, due og grøn anole (en lille øgle). Foto: Peter F. Gammelby, AU

SÅDAN VIRKER FUGLES NETHINDER UDEN ILT

Nervevæv dør normalt hurtigt, hvis det ikke får ilt. Alligevel fungerer fugles nethinder – som hører til blandt de mest energikrævende væv i dyreriget – permanent uden ilt. Otte års forskning har nu løst det mysterium.

Iet studie publiceret for nyligt i *Nature*, viser et internationalt forskerhold ledet fra Aarhus Universitet, hvordan fugle har løst et biologisk paradoks: Hvordan kan fugles nethinder fungere uden blodkar og dermed uden ilt? Forskerne dokumenterer, at de inderste dele af fugles nethinder får energi ved at omdanne glucose med en hidtil uset effektivitet. Samtidig vælter studiet en mangeårig antagelse om funktionen af en mystisk struktur i øjet, som har undret forskere siden 1600-tallet.

Nethinden kræver masser af energi

Hos de fleste dyr forsynes nervevæv med ilt gennem tætte netværk af små blodkar (kapillærer). Det betragtes som helt afgørende, da nerveceller har et usædvanligt højt energiforbrug. Nethinden, som er en højt specialiseret forlængelse af hjernen, er ingen undtagelse – og forbruger faktisk mere energi end noget andet væv i kroppen.

Fugle udgør imidlertid et paradoks. Deres nethinder mangler blodkar

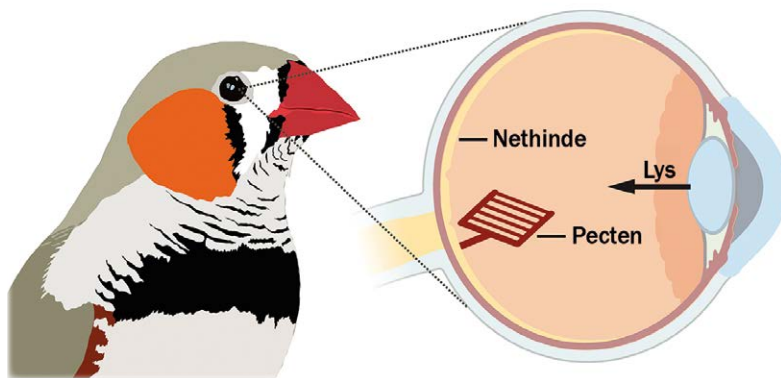
i selve nethindevævet. Denne egenskab menes at forbedre synsskarphe den, fordi blodkar spreder lyset på vej til sansecellerne. Men hvordan nethinden overlever uden blodforsyning har hidtil været ukendt.

»Vores udgangspunkt var simpelt,« siger Christian Damsgaard, førsteforfatter på studiet og lektor ved Institut for Biologi, Aarhus Universitet. »Ud fra alt, hvad vi ved om fysiologi, burde dette væv ikke kunne fungere.«

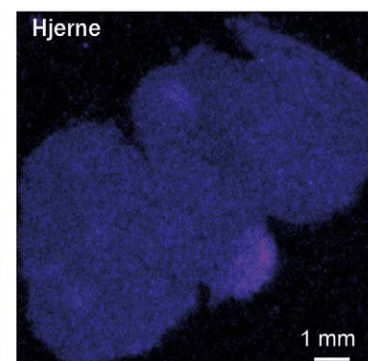
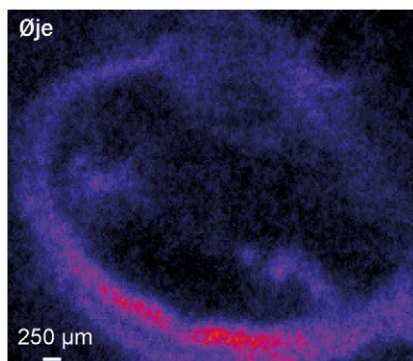
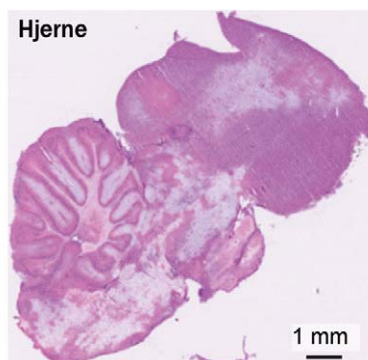
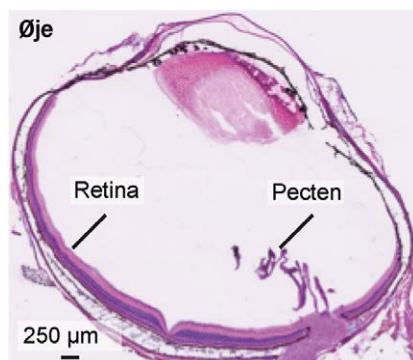
Forfatter
Peter Gammelby,
journalist, Aarhus
Universitet

Forskerne
Christian Damsgaard
er lektor ved Institut for
Biologi, Aarhus Universi-
tet. cd@bio.au.dk

Jens Randel Nyengaard
er professor ved Institut
for Klinisk Medicin,
Aarhus Universitet. jrny-
engaard@clin.au.dk



Pecten oculi er en struktur med blodkar inde i fuglejenes glaslegeme. Dens funktion har hidtil været ukendt. Illustration: Aleksandrina Mitseva / Nature



Studiet viser, at pecten forsyner nethinden med glukose i en hastighed, der langt overgår glukoseforsyningen til hjernen. Dette er illustreret på på scanningsbillederne med radioaktiv mærket glucose, som viser meget højere glukoseoptag (pink) i nethinden i forhold til hjernen. Fotos: Christian Damsgaard og Morten Busk, Aarhus Universitet / Nature

Vejen til en løsning på mysteriet viste sig at være alt andet end simpel. Det har taget Damsgaard og et stadigt voksende forskerhold – primært fra Aarhus Universitet – otte år at nå frem til de resultater, som nu er offentliggjort.

Ingen ilt dér, hvor man troede

I århundreder har den dominerende forklaring været, at en struktur kaldet pecten oculi – et kamformet organ med masser af blodkar, der rager ind i øjets glaslegeme – leverer ilt til nethinden. Strukturen

har været kendt siden 1600-tallet, men forklaringer på, hvad den præcist laver derinde i øjet, har hidtil været baseret på antagelser. Det skyldes ikke mindst, påpeger forskerne, at ingen tidligere har kunnet måle ilt-niveauerne direkte i fugles nethinder under normale fysiologiske forhold.

»Det er teknisk ekstremt udfordrende,« siger studiets seniorforfatter Jens Randel Nyengaard, der er læge og professor ved Institut for Klinisk Medicin, Aarhus Universitet.

»Man skal holde dyret i stabile, fysiologisk normale tilstande, samtidig med at man udfører meget følsomme målinger.«

I 2020 lykkedes det forskerholdet at gøre netop dette, takket være et samarbejde med dyrlæge og ekspert i anæstesi, lektor Catherine Williams Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab på Aarhus Universitet. Og resultaterne var uventede: Pecten oculi leverer slet ikke ilt til nethinden. Målingerne viste, at de inderste lag af nethinden næsten ikke modtager ilt, og at omtrent halvdelen af nethindevævet slet ikke modtager ilt.

Hvert svar gav nye spørgsmål

Hvis nethinden ikke får ilt, hvordan producerer den så tilstrækkelig energi til at fungere?

For at besvare det spørgsmål iværksatte forskerne et flerårigt studie, der kombinerede fysiologi, molekylærbiologi, billeddannelse og dataanalyse. Fremdriften var langsom, dels fordi datamængderne var uhyre komplekse og dels på grund af COVID-19-pandemien, som begrænsede forskernes adgang til laboratorierne. Ved hjælp af en metode kaldet spatial transcriptomics kortlagde forskerne aktiviteten af tusindvis af gener i tynde snit af nethinden, hvilket gjorde det muligt at se, hvilke metaboliske processer der var aktive hvor.

»Vi kiggede ikke på ét eller to gener, men på 5.000 til 10.000 gener på én gang, hver knyttet til en præcis position,« siger Christian Damsgaard. »Det gav os en slags molekylært GPS-system.«

Dataene afslørede et markant mønster: Gener involveret i forbrænding af glucose uden ilt (anaerob glykolyse) var stærkt aktive i de iltfrie inderste lag af nethinden. Anaerob glykolyse giver dog omkring 15 gange mindre energi per glucosemolekyle, end iltbaseret stofskifte gør.

»Det rejste endnu et spørgsmål,« siger Jens Randel Nyengaard.

»Hvordan kan et af kroppens mest energikrævende væv overleve på så ineffektiv en proces?«

En ny rolle for en gammel struktur

Svaret kom gennem et samarbejde med eksperter i metabolisk billeddannelse – altså scanninger, der visualiserer kroppens stofskifte. Ved hjælp af radioaktiv mærket glucose kunne forskerne vise, at fugles nethinder optager glukose i langt højere grad end resten af hjernen. Det førte forskerne tilbage til pecten oculi, altså det kamformede organ inde i øjets glaslegeme.

Ved at analysere deres spatial transcriptomics-data igen opdagede forskerne, at pecten oculi indeholder en masse transportproteiner for glucose og mælkesyre. Strukturen fungerer altså som en port for stofskiftet: Den leverer store mængder glucose ind i nethinden og fjerner

mælkesyre – som er et affaldsprodukt fra anaerobt stofskifte – tilbage til blodbanen.

»Pecten er ikke en iltforsyning. Det er et transportsystem for brændstof ind og affald ud,« forklarer Jens Randel Nyengaard.

Opdagelsen ændrer grundlæggende forståelsen af en struktur, som har været misfortolket i århundreder.

»Vi vælter i praksis ét korthus og erstatter det med et andet. Jeg kalder det et korthus, fordi videnskabelige resultater ikke er hugget i sten. Nye fund kan føje ny viden til. Sådan udvikler videnskaben sig,« tilføjer Jens Randel Nyengaard.

Evolutionære og medicinske perspektiver

Forskerne peger på, at fraværet af ilt og blodkar i nethinden sand-

synligvis giver en optisk fordel og bidrager til skarpere syn. Genetiske analyser af fuglenes evolution tyder på, at denne egenskab opstod i dinosaurernes slægtslinje, som senere gav ophav til nutidens fugle. Studiet er ren grundforskning, men forskerne fremhæver, at resultaterne kan have bredere perspektiver.

»Når mennesker får blodpropper, bliver vores væv skadet, fordi det får for lidt ilt, og der ophobes affaldsstoffer. I fuglens nethinde ser vi et system, der håndterer iltmangel på en helt anden måde,« siger Jens Randel Nyengaard.

Og tilføjer: »Hos fugle har naturen løst et fysiologisk problem, som gør mennesker syge. Vi håber, at den nye indsigt kan inspirere nye måder at tænke over, hvorfor væv svigter ved iltmangel, og hvordan sådanne sygdomme kan behandles en gang i fremtiden.« ■

Videnskabelig artikel:
Damsgaard, C., Skøtt, M.V., Williams, C.J.A. et al. Oxygen-free metabolism in the bird inner retina supported by the pecten. *Nature* (2026). doi.org/10.1038/s41586-025-09978-w

Ulykke gav unikt grise-eksperiment

I kølvandet på ulykken på Fukushima-atomkraftværket i Japan i 2011 slap en masse tamgrise ud i det affolkede landbrugslandskab og de omkringliggende skove. Her parrede de sig med lokale vildsvinepopulationer. Kombinationen af en enkelt samlet introduktion af tamgrise og fraværet af menneskelig aktivitet har skabt en unik mulighed for at undersøge, hvordan hybridisering mellem husdyr og vilde populationer udvikler sig over tid uden menneskelig indblanding.

Og det er netop, hvad japanske forskere fra Fukushima Universitet og Hirosaki Universitet har gjort. I et nyt genetisk studie publiceret i *Journal of Forest Research* viser forskerne, at tamgrisens genetiske aftryk til forskernes overraskelse forsvinder hurtigere end forventet. Forklaringen ligger i den måde, hvorpå tamgrisens reproduktions-



Studiets resultater kan være relevant alle steder, hvor tamgrise og vildsvin (som på billedet) overlapper. Foto: Colourbox

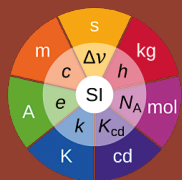
ne. I modsætning til vildsvin, som normalt kun reproducerer én gang årligt, kan tamgrise få flere kuld om året. Denne hurtige reproduktionscyklus blev bevaret hos hybriderne og førte til en markant hurtigere generationsudskiftning.

Forskerne analyserede både mitokondrie-DNA (som kun arves fra moderen) og genetiske markører fra cellekernen fra 191 vildsvin og 10 tamgrise indsamlet mellem 2015 og 2018. Resultaterne viste, at indi-

vider med tamgris-mitokondrie-DNA havde en betydelig lavere andel af tamgrise-gener i deres kerne-DNA end hybrider med vildsvin som mor. Mange individer med tamgris i moderlinjen havde allerede fjernet sig mere end fem generationer fra det oprindelige kryds. Det tyder på en usædvanlig hurtig genetisk udskiftning drevet af gentagen tilbagekrydsning med vildsvin.

Selvom Fukushima-situationen var enestående, understreger forskerne, at mekanismen sandsynligvis også spiller en rolle globalt, hvor tamgrise og vildsvin overlapper. Studiet kan derfor få praktisk betydning for naturforvaltning og bekæmpelse af invasive arter – særligt ved at forudsige risikoen for vækst i en population og ved at gøre det muligt mere målrettet at fjerne bestemte hybridtyper.

CRK, Kilde: Eurekalert/Anderson, D. et al. (2026). *Jour. of Forest Research*, 1–6.



AMPÈRE

SATTE MÅL PÅ DEN ELEKTRISKE STRØM



Ampere er SI-enheden

til måling af elektrisk strømstyrke.

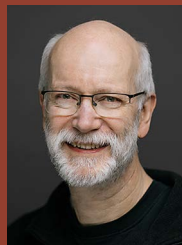
Enheden spiller derfor en central rolle i vores gennemelektrificerede hverdag.

Samtidig er den en vedvarende hyldest til den franske matematiker og fysiker

André-Marie Ampère, som skabte det teoretiske grundlag for begrebet elektrisk strøm.

Præcisionsampere-
meter fra Steno
Museets samling.
Foto: Kim Frost,
AU Foto

Forfatteren



Hans Buhl er
samlingsleder og
museumsinspektør for
videnskabshistorie på
Steno Museet/Science
Museerne ved Aarhus
Universitet. Han er bl.a.
optaget af samspillet
mellem den videnska-
belige og den teknolo-
giske udvikling.
hans.buhl@sm.au.dk

Flere af de fundamentale enheder i SI-systemet (Système International d'Unités) sætter mål på størrelser, som vi umiddelbart kan sanse, og som derfor har været kendt – og målt – siden oldtiden: for eksempel længde, masse og tid. Men sådan er det ikke med den elektriske strøm. Den er usynlig, og selvom mange nok har prøvet at få et mindre stød, har vi ikke på samme måde kropslig erfaring med strømstyrke. Det er givetvis medvirkende til, at den elektriske strøm kun har været kendt i godt 200 år.

Fra statisk elektricitet til elektrisk strøm

Man begyndte først for alvor at studere elektriske fænomener i 1700-tallet. Der var udelukkende tale om statisk elektricitet, som blev frembragt ved hjælp af såkaldte elektrisermaskiner. Der blev lavet lange gnister, og man undersøgte blandt andet elektrostatisk tiltrækning og frastødning. Det viste sig, at elektriciteten kunne ledes over korte afstande gennem tråde og kæder af metal. Det førte til forskellige teorier om, at elektricitet kunne forstås som et eller flere "fluida", altså en slags usynlige og

altgennemtrængende "væsker", der flød i lederen.

Denne ide blev væsentlig styrket, da den italienske fysiker Alessandro Volta i 1800 opfandt batteriet. Batteriet gjorde det nemlig muligt at frembringe en vedvarende strøm i modsætningen til elektrisermaskinernes kortvarige udladninger. Volta talte selv om, at der var en kontinuerlig "strøm af det elektriske fluidum" mellem batteriets poler, så længe de var forbundet af et ledende materiale. Det kunne være en ledning – eller dele af kroppen. Han registrerede nemlig

den "elektriske strøm", som han kaldte den, ved at lade forskellige dele af kroppen indgå i forbindelsen og mærke den smerte eller sitren, det fremkaldte.

Muligheden for at frembringe en nogenlunde konstant jævnstrøm var en vigtig forudsætning for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen i 1820. Opdagelsen inspirerede blandt mange andre den franske matematiker og fysiker André-Marie Ampère til videre undersøgelser, som snart gav en meget dybere forståelse af den elektriske strøm.

Ampères bedrift

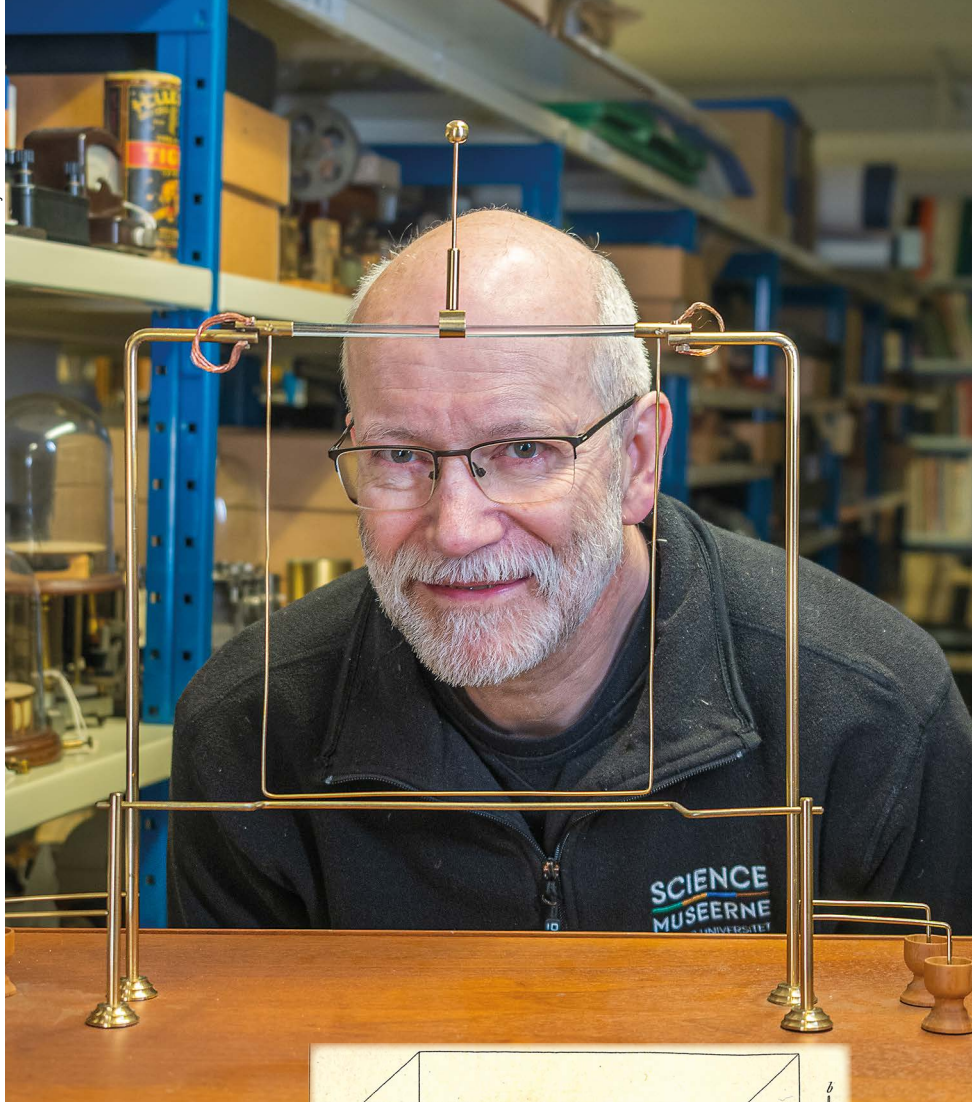
Da Ampère gentog Ørsteds forsøg med en kompasnål tæt på en strømførende ledning, observerede han, at kompasnålen også gav udslag, når han holdt den over batteriet. Det fik ham til at indse, at strømmen ikke bare løb i ledningen, der forbandt batteriets poler, men i hele det lukkede kredsløb, som ledningen og batteriet dannede. Lige så selvfølgelig som det er for os i dag, lige så radikal var opdagelsen på Ampères tid.

I forbindelse med sine forsøg fik Ampère den tanke, at Jordens magnetfelt kunne skyldes strømme i Jordens indre. Men så var det jo også muligt, at en stangmagnet fik sin magnetisme fra elektriske strømme i magnetens indre. Denne tankerække førte Ampère til den dristige antagelse, at al magnetisme skyldes elektriske strømme.

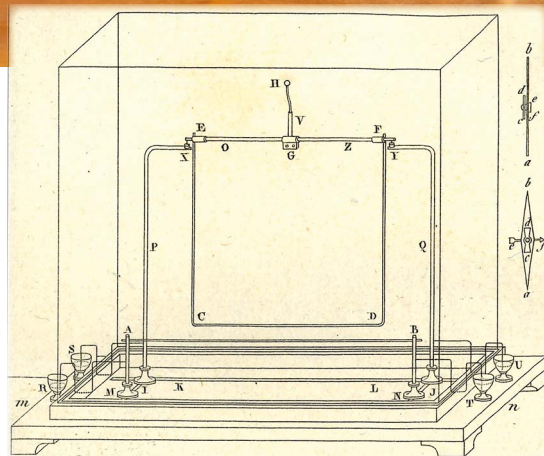
Denne hypotese blev styrende for Ampères videre forskning, som blev en bestræbelse på at beskrive kraften mellem to infinitesimale strømelementer, dvs. to uendeligt små stykker strømførende ledning. Da man jo ikke kan realisere sådanne isolerede strømelementer i praksis, udviklede Ampère en lang række apparater, hvormed han kunne undersøge særlige situationer.

Det første af disse apparater bestod af to parallelle ledninger, hvoraf den ene var fast, mens den

Foto: Peter Gammelby



Til højre ses Ampères skitse af det apparat, som han i 1820 konstruerede til at undersøge kraften mellem to parallelle, strømførende ledere. Den ene leder sidder fast, mens den anden danner en fint afbalanceret gynge, som kan give et udslag selv ved en ret lille strømstyrke. Ovenfor ser forfatteren nærmere på den rekonstruktion af apparatet, der findes i Steno Museets samling.



anden var monteret, så den frit kunne bevæge sig. Det viste sig, at de to ledninger tiltrak hinanden, når strømmen løb samme vej i dem, mens de frastødte hinanden, når strømmene var modsatrettede. Hermed var det lykkedes Ampère at omsætte strømstyrken i ledningerne til en mekanisk kraft imellem dem. Dvs. at strømstyrken i princippet kunne udtrykkes ved velkendte størrelser som længde, masse og tid. Til brug i sine beregninger indførte Ampère symbolet I for strømmen. Det er en forkortelse af *intensité du courant*, dvs. strømstyrke.

I de følgende år udviklede Ampère en fuldstændig elektrodynamisk teori for kraften mellem elektriske strømme. James Clerk Maxwell, der senere udviklede den endegyldige teori for alle elektromagnetiske fænomener, omtalte derfor Ampère som "elektricitetsens Newton".

Ampères forsøg med parallelle ledninger kom til at danne grundlag for den definition på 1 ampere, som gjaldt fra 1948 til 2019: "En ampere er strømstyrken af en konstant elektrisk strøm, der – når den løber i to parallelle, uendeligt lange ledere med forsvindende



Foto: J. Lee/NIST.

Sølvvoltameter til præcis måling af elektrisk strømstyrke ved hjælp af elektrolyse. Det består af et platinkar, der fungerer som katode, og en sølvanode. Hvis karret fyldes med en sølvnitratopløsning, og der sendes strøm igennem, vil der afsættes sølv på karret. Ved at veje hvor meget tungere det er blevet i et givet tidsrum, kan man bestemme strømstyrken.

lille cirkulært tværsnit, som har en indbyrdes afstand på 1 meter og er anbragt i det tomme rum – bevirker, at den ene leder påvirker den anden med kraften $2 \cdot 10^{-7}$ N for hver meter.” Men det var en meget lang og snørklet vej at nå til denne definition. Og som det vil fremgå af det følgende, var den alligevel behæftet med flere problemer. Derfor er 1 ampere i dag defineret på en helt anden måde ud fra en fundamental naturkonstant.

Elektriske enhedssystemer

I årtierne efter Ampères gennembrud arbejdede mange fysikere med at finde den teoretiske sammenhæng mellem de forskellige elektriske størrelser, som man opdagede og definerede. For eksempel fandt den tyske fysiker Georg Simon Ohm en sammenhæng mellem strømstyrke (I), spænding (U) og elektrisk modstand (R), idet han viste, at spændingen over en modstand er lig med produktet af modstanden og strømmen igennem den: $U = R \cdot I$.

Samtidig gjorde den spirende udvikling af telegrafanlæg, elmotorer og generatorer det stadig mere påtrængende at få defineret nogle enheder for de elektriske størrelser, så man kunne måle, hvad der skete i ledningerne og apparaterne – og være enige om målingerne. Derfor begyndte man fra midten af 1800-tallet at udvikle elektriske enhedssystemer i flere lande.

For eksempel blev der i England i 1861 nedsat et udvalg af fysikere, der skulle udvikle et enhedssystem. Da man dengang grundlæggende opfattede verden mekanisk, ønskede udvalgets medlemmer ikke at indføre nye selvstændige elektriske enheder. De ville i stedet udnytte Ampères sammenkobling af elektrisk strøm og mekanisk kraft til at definere de elektriske enheder ud fra de ”mekaniske” enheder centimeter, gram og sekund. Det førte til nogle elektriske enheder, som var ret kontraintuitive. For eksempel fik elektrisk modstand enheden cm/s, altså en hastighed. En yderligere komplikation var, at det i cgs-systemet, som det kaldtes, var nødvendigt at lave vidt forskellige enheder for elektromagnetiske og elektrostatiske fænomener.



Inspireret af Rousseaus pædagogiske ideer fik André-Marie Ampère (1775-1836) ingen formel uddannelse. Men grundig hjemmeskoling og selvstudier udviklede hans store begavelse. Allerede som barn læste han komplicerede matematiske værker. På trods af de manglende formelle kvalifikationer blev han professor i matematik og fysik i Paris.

Som om det ikke var slemt nok, var cgs-enhederne ovenikøbet ofte enten for små eller for store til praktisk brug. Derfor blev der tilføjet et supplerende sæt af såkaldt praktiske enheder. Ret forvirrende. Andre lande udviklede deres egne systemer. Så inden længe blev der anvendt mindst 10 forskellige enheder for strøm, 12 for spænding og hele 15 forskellige enheder for modstand.

Dette babelske kaos førte til, at man i 1881 afholdt Den Første Internationale Elektriske Kongres i Paris. Der var over 250 delegerede fra 28 lande, heriblandt nogle af tidens mest prominente videnskabsmænd og ingeniører.

Hvor meget er 1 ampere?

Hovedresultatet af kongressen var, at man besluttede at gøre det engelske enhedssystem internationalt gældende med enkelte justeringer. Dermed blev betegnelserne ohm for modstand og volt for spænding gjort internationale. Desuden blev man enige om betegnelserne ampere og coulomb for henholdsvis strøm og ladning som en hyldest til kongressens værtsland.

Ud over at definere de elektriske enheder i cgs-systemet besluttede kongressen, at de elektriske enheder skulle have materielle repræsentationer, ligesom eksempelvis enheden meter på det tidspunkt var defineret ved en målestok, den internationale meterprototype.

1 ohm blev i praksis fastlagt som modstanden i en kviksølvstøbe med et tværsnitsareal på én kvadratmillimeter og en længde på 106,3 cm ved 0 °C.

1 volt blev fastlagt som spændingen fra et såkaldt Daniell-element, der er et meget stabilt batteri.

Endelig blev 1 ampere fastlagt som den strøm, der, hvis den sendes gennem en sølvnitratopløsning, vil afsætte 0,001118 gram sølv per sekund på katoden. Denne kemi-

ske definition blev valgt, fordi den tidligere nævnte kraft på parallelle strømførende ledere var umulig at måle i praksis.

Selvom det for så vidt var nyttigt, at enhederne for modstand, spænding og strøm var realiseret hver især, skabte det hurtigt nye problemer. Det gjorde nemlig systemet over-

$$U = R \cdot I,$$

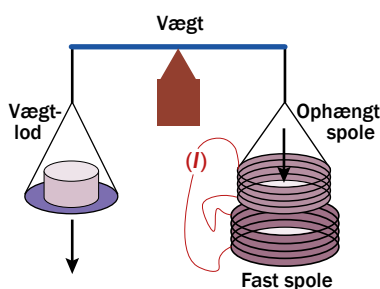
er spænding, strømstyrke og modstand jo ikke uafhængige størrelser. Hvis man kender to af størrelserne, kan den tredje beregnes. Men efterhånden, som man blev i stand til at måle mere præcist, viste det sig, at de vedtagne standarder var fastlagt forkert og derfor ikke opfyldte Ohms lov. Ups!

Den foreløbige løsning kom på en international konference i London i 1908, hvor man besluttede at reducere antallet af elektriske basisenheder fra tre til to ved at omdefinere volt til en afledt enhed.

Fra MKSA til SI

Det var dog en lappeløsning, som ikke ændrede på, at de i praksis anvendte måleenheder var forskellige fra de teoretiske cgs-enheder. Eller på at der opstod nogle meget besværlige omregningsfaktorer mellem diverse elektriske cgs-enheder som konsekvens af kravet om, at systemet udelukkende måtte baseres på de mekaniske grundenheder længde, masse og tid. Det bidrog til en voksende erkendelse af, at verden ikke kun skulle forstås mekanisk, men at det var nødvendigt at integrere elektricitetslæren som et selvstændigt element i beskrivelsen.

I 1901 viste den italienske fysiker og elektroingenør Giovanni Giorgi, at det er muligt at skabe et rationelt, kohærent og konsistent enhedssystem ved at supplere de tre mekaniske enheder meter, kilogram og sekund (MKS) med en fjerde enhed af elektrisk natur. Der var nogen diskussion om, hvilken af de elektriske enheder, man skulle vælge. Det vigtigste var, at den valg-



Billedet viser en amperevægt fra USA's National Bureau of Standards (nu NIST). Som principtegningen viser, består den af en følsom laboratorievægt, hvor den ene vægtskål er erstattet af en spole, som hænger over en fastmonteret spole. Strømstyrken (I) i spolerne bestemmes ud fra, hvor meget masse der skal lægges på vægtskålen for at modsvare tiltrækningen mellem spolerne.

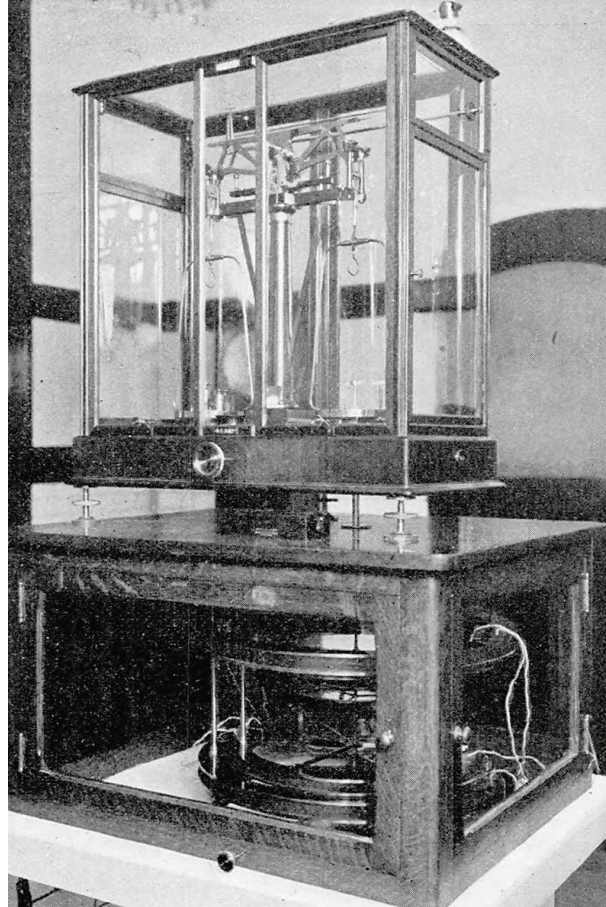
Kilde: Standards Yearbook 1927.

te enhed kunne realiseres nøjagtigt og reproducerbart. Derfor blev det ampere, da mange nationale standardiseringslaboratorier allerede var i gang med præcisionsmåling af strømstyrke ved hjælp af såkaldte amperevægte.

Amperevægten, eller strømvægten som den også kaldes, er et elektromekanisk apparat, der bruges til meget præcis måling af elektrisk strømstyrke. Strømmen, der skal måles, føres gennem to trådspoler, hvoraf den ene er fast, mens den anden er monteret på den ene arm af en følsom vægt. Den elektromagnetiske kraft mellem de to spoler bestemmes så ud fra den masse, der skal placeres på vægts modsatte arm for at opretholde ligevægt. Når spolerens geometri er kendt, kan strømstyrken derefter beregnes nøjagtigt ud fra kraften.

Det var på dette grundlag, at Bureau International des Poids et Mesures i 1948 ændrede definitionen på 1 ampere til den ovennævnte om kraften mellem to parallelle ledere.

Giorgis såkaldte MKSA-system byggede bro mellem den abstrakte fysik og målinger i den virkelige verden og har derfor været nyttigt



for både teoretikere og praktikere. Samtidig har det helt sikkert gjort det knapt så svært for skoleelever og studerende at sætte sig ind i elektricitets teorier, som det ellers ville have været. Derfor blev Giorgis system grundlaget for SI-systemet, som efter et længere tilløb blev etableret af Meterkonventionens medlemslande i 1960.

Den nye amperedefinition

Selvom den nævnte definition smukt udsprang af Ampères opdagelser, havde den både praktiske og principielle problemer, som bidrog til, at realiseringen af 1 ampere havde en relativ usikkerhed på 10^{-6} til 10^{-7} .

Det praktiske problem var, at det på trods af præcise strømvægte var svært at måle 1 ampere nøjagtigt nok.

Det principielle problem var, at amperedefinitionen på grund af koblingen til mekanisk kraft afhang af definitionen af masse og dermed af en materiel prototype, kilogramloddet i Paris. Men da massen af loddet tilsyneladende fluktuerede en lille smule, var 1 ampere heller ikke veldefineret. Derfor var der et voksende ønske om at definere enhederne kilogram og ampere ud

Amperemetret

Det er børnelærdom for mange, at man måler elektrisk strømstyrke med et amperemeter. Der er måske færre, der ved, at måleinstrumentet udspringer direkte af Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen i 1820. Han bemærkede nemlig, at størrelsen af kompasnålels udsving afhang af strømstyrken i ledningen. Ørsteds forsøgsopstilling var altså en primitiv strømmåler.

Den tyske videnskabsmand Johann Schweigger videreudviklede straks ideen ved at vikle en ledning mange gange rundt om et kompas, hvorved han gjorde instrumentet langt følsommere. Han kaldte det derfor en multiplikator. Ulempen ved denne type instrument var, at det skulle orienteres på en ganske bestemt måde i forhold til Jordens magnetfelt.

Det klassiske elektromekaniske amperemeter er af en senere type. I 1882 opdagede fysikeren Jacques-Arsène d'Arsonval og elektroingeniøren Marcel Deprez nemlig, at de kunne lave et meget mere nøjagtigt instrument ved i stedet at benytte en stationær, permanent magnet og en bevægelig spole. Ud over at have bedre følsomhed og linearitet var det såkaldte drejespoleinstrument også mindre påvirket af ydre magnetiske felter.

I dag er de fleste amperemetre integreret i et digitalt multimeter. Heri omsættes den målte strøm af en analog-til-digital-konverter til en talværdi, som vises på et display.

Demonstrationsamperemeter fra Steno Museets samling. Bemærk drejespoleinstrumentets opbygning med en bevægelig spole placeret i en hesteskomagnet. Spolen er vundet omkring en kerne af blødt jern for at koncentrere og forstærke det magnetiske felt i spolen.

Elektrikere og teknikere bruger ofte et såkaldt tangamperemeter. Det er et digitalt multimeter, som er udstyret med en klemme, der kan gribe omkring en ledning. Derved er det muligt at måle strømmen i ledningen induktivt uden at skulle afbryde kredsløbet.



Foto: Kim Frost, AU Foto

Multiplikator fra midten af 1800-tallet. Messingnålen på tværs af kompasnålen er umagnetisk og fungerer som viser. Instrumentet kan roteres, så kompasnålen i hvilestilling ligger inde i spolen. Instrumentet indgår i Steno Museets store samling af måleinstrumenter.

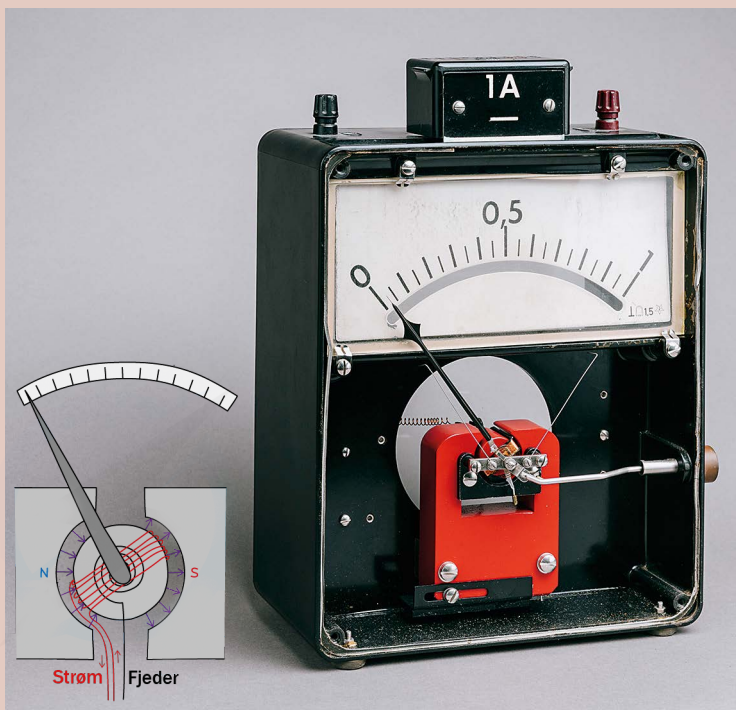


Foto: Kim Frost, AU Foto



Foto: Colourbox

fra uforanderlige naturkonstanter i stedet for et fysisk objekt.

For at løse begge problemer indførte Bureau International des Poids et Mesures 20. maj 2019 en ny definition på 1 ampere, som tager udgangspunkt i elementarladningen. Det betyder, at man ikke længere fastlægger 1 ampere ud fra en kraftpåvirkning, men ved at tælle elektroner. Baggrunden er, at vi nu – i modsætning til Ampère – ved, at strøm er et udtryk for ladning i bevægelse. Jo flere ladninger per sekund, desto større strømstyrke.

Enheden for elektrisk ladning, coulomb (C), var tidligere defineret som den ladning, en strøm på 1 ampere leverer i løbet af 1 sekund, dvs. $C = A \cdot s$. Det betød, at elementarladningens *målte* værdi på cirka $1,602 \cdot 10^{-19}$ C var fastsat ud fra definitionen af 1 ampere – med den usikkerhed, den besad. Med den nye definition har man vendt det hele på hovedet ved at gøre elementarladningens værdi til en *defineret størrelse*.

Selvom det intuitivt giver god mening at definere strømstyrken ud fra, hvor meget ladning der passerer et tværsnit per sekund, er den formelle definition noget kryptisk: "Ampere ... er defineret ved at fastsætte den numeriske værdi af elementarladningen e til at være eksakt $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$, når den udtrykkes i enheden C, som er lig med A s, hvor sekundet er defineret fra $\Delta\nu_{Cs}$."

Sagt på mere jævnt dansk betyder det, at 1 ampere er den strømstyrke, der opstår, når $1/1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ elementarladninger svarende til $6.241.509.074.460.762.608$ elektroner løber igennem et tværsnit af en ledning hvert sekund.

Hvordan udmåler vi nu 1 ampere?

Som man måske kan fornemme, er realiseringen af denne definition heller ikke trivial. I praksis gør



Credit: NIST, © Robert Rathe

Ultrapræcise elektriske målinger skal foregå ved meget lave temperaturer for at mindske den elektriske støj. Her ses fysikeren Rand Elmquist fra National Institute of Standards and Technology (NIST) fylde flydende helium på et apparat til måling af kvante-Hall-effekten for at køle det ned til tæt på det absolutte nulpunkt.

man det på to forskellige måder: Enten tæller man elektroner, eller også går man en omvej, hvor man via ekstremt præcise målinger af spænding og modstand kan regne sig frem til strømstyrke.

Elektrontælling foregår ved hjælp af såkaldte enkeltelektronkilder. De er baseret på særlige kvanteprocesser, som gør det muligt at frembringe et veldefineret antal elektroner per sekund. De dannede strømme er dog kun på få pA (10^{-12} A), så for at metoden kan bruges i praksis, er man afhængig af meget kraftige og støjsvage strømforstærkere.

Det er derfor, man i stedet ofte går via to kvantemekaniske fænomener kaldet Josephson-effekten og kvante-Hall-effekten, som forbinder både spænding og modstand med bestemte kombinationer af Plancks konstant h og elementarladningen e . Derved

kan man meget præcist realisere 1 volt og 1 ohm ud fra disse naturkonstanter værdi, og derefter fastlægge den korrekte størrelse af 1 ampere ved hjælp af Ohms lov.

Med den nye amperedefinition og disse metoder, er det nu muligt at realisere 1 ampere 10-100 gange mere præcist end med den tidligere definition.

Selvom det i mange videnskabelige og højteknologiske sammenhænge er vigtigt med en præcist defineret og nøjagtigt realiserbar ampere, er det heldigvis ikke noget, man behøver at bekymre sig om i dagligdagen. Både den store strøm i lampen over dit hoved og de små strømme i mobiltelefonen i din hånd skal nok løbe alligevel. Og selv hvis du en gang imellem bruger et amperemeter, er det ikke den nye definition, der afgør, om det måler rigtigt. ■

Videre læsning

Neal Carron (2015) Babel of Units. The Evolution of Units Systems in Classical Electromagnetism, arxiv.org/abs/1506.01951.

National Institute of Standards and Technology (NIST) om ampere: www.nist.gov/si-redefinition/ampere-introduction

Om SI-systemet: www.bipm.org/en/publications/si-brochure/

Om realiseringen af de elektriske enheder: www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique

SMAGSDETEKTIVER PÅ ARBEJDE

– på sporet af den forsvundne silphium

Planten silphium var en af antikkens mest værdifulde handelsvarer og blev anvendt til medicinske og kulinariske formål. Den mentes at være uddød i det 1. århundrede.

En nyfundet plante i Anatolien påstås at være den tabte silphium.

Hvordan kan forskningen være med til at afgøre, om det er rigtigt?

Om forfatterne



Gabriele Agnini er videnskabelig medarbejder



Miriam Pedersen er studerende



Mikael A. Petersen er lektor



Ole G. Mouritsen er professor emeritus
ole.mouritsen@food.ku.dk

Alle med tilhørsforhold til FOOD, Københavns Universitet



Kyrenske mønter med prægninger af silphium-planten og dyr som spiser af den.

Foto: Trustees of the British Museum.

Silphium (silphion på græsk) er navnet på en næsten mytisk plante, fra hvis rod en meget eftertragtet harpiks blev udvundet i antikken. Planten voksede i den kyreniske region i det nuværende Libyen for mindst 2.500 år siden og spredte sig muligvis til andre regioner omkring Middelhavet.

Harpiksen blev udbredt i hele Middelhavsområdet og var værdsat for sine mange medicinske og kulinariske anvendelser. Silphium blev i seks århundreder betragtet som en vigtig del af økonomien i bystaten Kyrene. Det er almindeligt antaget og beskrevet af en række af antikkens forfattere, blandt andet Plinius den Ældre (24-79 e.Kr.), at planten forsvandt og måske uddøde i løbet af det 1. århundrede.

En isoleret population af planten *Ferula drudeana* fundet på Den

Anatolske Højslette er for nylig blevet foreslået at være den "uddøde" silphium.

Det er lykkedes os i samarbejde med tyrkiske og britiske forskere at få en prøve af harpiks fra den sjældne *F. drudeana*, og vi har igangsat studier af harpiksens kulinariske egenskaber. Ved kombination af analytisk-kemiske teknikker, sensoriske målinger, gastronomiske præparationer samt eksperimentel smags-arkæologi, blandt andet ved brug af antikkens opskrifter, har vi opnået ny viden, der kaster nyt lys over spørgsmålet: er antikkens mest ikoniske plante genfundet?

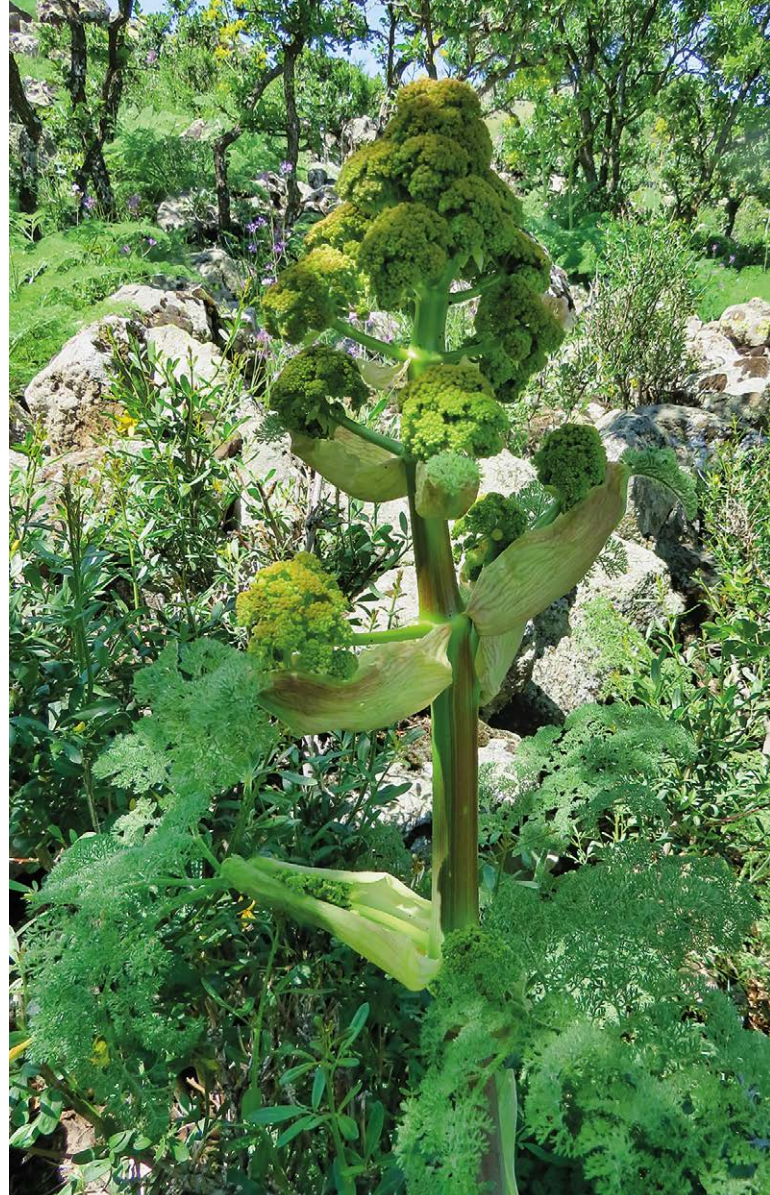
Historisk baggrund

Det er en almindelig opfattelse, at silphium gik tabt og muligvis uddøde i løbet af det 1. århundrede e.Kr. på grund af overhøstning, vanskeligheder med dyrkning og kultivering, og fordi dens frugter blev spist af

vilde dyr: Mønter fra Kyrene viser ofte dyr, der spiser planten.

Harpiks fra silphium var en værdifuld handelsvare i Middelhavsområdet fra omkring 500 f.Kr. og 600 år fremefter. Der er tegn på, at silphium blev brugt tidligere, både i den minoiske kultur og i det gamle Egypten. Silphium er nævnt i en række gamle manuskripter, ikke mindst af botanikkens fader Theophrastus (371-287 f.Kr.), der beskrev plantens udseende og morfologi.

Planten blev ikke dyrket, men voksede vildt på et landområde mellem Middelhavet og det bakkede bagland i Libyen. Den var kendt for at være vanskelig at omplante. Lægekunstens fader Hippokrates (460-370 f.Kr.) nævner mange af silphiums medicinske anvendelser, for eksempel mod brok. Andre klassiske forfattere anså silphium for nærmest at være et universallæge-



middel og anbefaler at bruge silphium til at helbrede hjertesygdomme, struma, mavepine, tandpine og epilepsi, og endda tjene som et elskovsmiddel og kraftigt præventionsmiddel og abortmiddel.

En ny *Ferula*-art under lup

Planten dyvelsdræk (asfoetida, *Ferula assa-foetida*) blev ofte brugt som en erstatning for den dyre silphium, og denne nulevende plante bruges nu til dags i afghansk og indisk madlavning. Dyvelsdræk hører til en slægt (*Ferula*) i skærmblomstfamilien, og der er omkring 220 forskellige *Ferula*-arter. Nogle eksemplarer af en ny *Ferula*-art blev indsamlet af W.E. Siehe i 1909 i Sydanatolien, og de bevarede eksemplarer blev senere i 1930 af L.E. Korovin identificeret som *Ferula drudeana*.

Små populationer af denne plante er nu blevet "genopdaget" i stenmu-

rede enklaver og botanisk karakteriseret et par gange på forskellige steder i Anatolien, og der er fra tyrkisk side igangsat et bevaringsarbejde for at beskytte denne sjældne og sårbare skærmpolante.

Den tyrkiske farmakolog Mahmut Miski har nu foreslået, at *Ferula drudeana* er en mulig kandidat til den "forsvundne" og mytiske silphium, som har overlevet på isolerede steder i Anatolien.

Det har ført til et formidabelt detektivarbejde med at indsamle viden om denne plantes egenskaber og sammenligne med de egenskaber af silphium, som er beskrevet i de gamle skrifter. Da der ikke findes noget DNA af den oprindelige plante, må opklaringsarbejdet indtil videre basere sig på indicier.

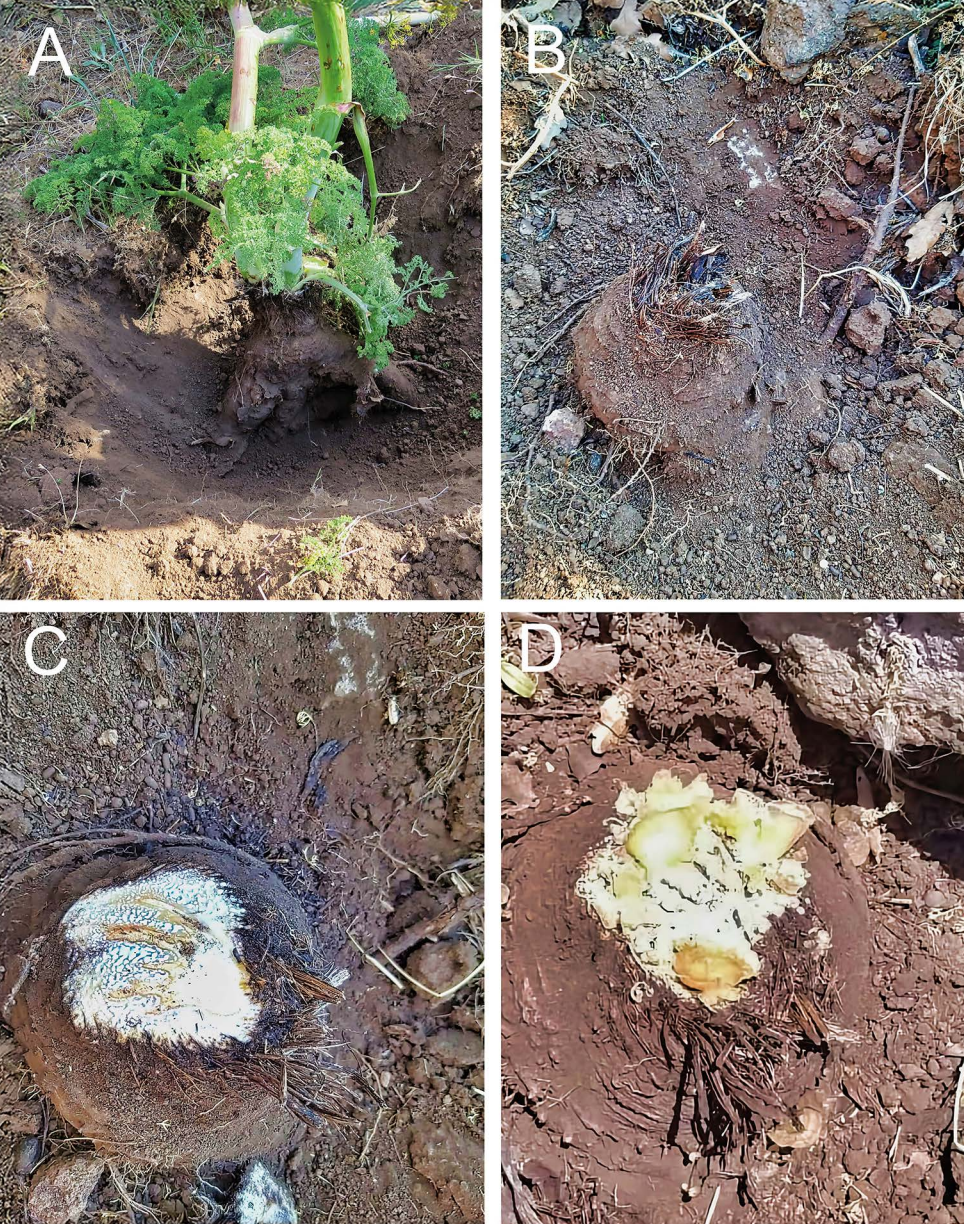
Et vigtigt skridt blev taget af Mah-

mut Miski ved at igangsætte et forskningsprogram til at identificere bioaktive forbindelser i planten og dens harpiks. Blandt de mange bioaktive stoffer, der er fundet, er komplekse terpenoider (for eksempel sesquiterpener som coumarin), phenylpropanoider og æteriske olier fra frugten. Flere af disse stoffer har antibakterielle og antioxidative egenskaber.

Den nuværende farmakologiske og medicinske viden om de fundne stoffer kan så sammenlignes med de påståede virkninger af den gamle silphium og dens harpiks, som er beskrevet i de klassiske skriftlige kilder. De foreløbige resultater viser, at de fundne stoffer i nogle tilfælde er kendt for at have en effekt på sygdomme, som stemmer overens med de gamle optegnelser om anvendelse af silphium ved forskellige medicinske indikationer.

En mulig kandidat for den "forsvundne" silphium: Den nulevende plante *Ferula drudeana* fundet i Anatolien. Til venstre ses hele planten og til højre en blomstrende stilk.

Foto: Mahmut Miski.



Billederne viser processen i at udtrække harpiks fra roden af skærmplanten *Ferula drudeana*, der vokser nær Mount Hasan i Aksaray-provinsen i det centrale Anatolien, Tyrkiet. Jorden omkring toppen af rødderne udgraves for at blottlægge kroneområdet af rodstængelen (A og B), og en tynd skive af roden skæres af, hvorefter saften udskilles fra roden (C). Hele det udgravede område tildækkes derefter for at forhindre, at den opskårne rodsektion udsættes for sollys og forurening. Efter to uger er den udtrukne saft størknet til en harpiks (D), som kan skrabes af. Fotos: Mahmut Miski



Harpiksen fra skærmplanten *Ferula drudeana* fremstår som en heterogen, halvfast masse med både gennemskinnelige og uigennemsigtige områder. Sorte indeslutninger og mørke områder er mindre rester fra ekstraktionsprocessen og naturligt plantemateriale. Det viste stykke er cirka 6-8 mm. Foto: Ole G. Mouritsen.

Kulinariske anvendelser

Som nævnt havde silphium i oldtiden ikke kun medicinske anvendelser, men blev også brugt i madlavning. Her samler en særlig interesse sig om en samling af gamle romerske opskrifter opkaldt efter Apicius (*De re coquinaria*). Samlingen indeholder mere end 450 opskrifter, hvoraf et stort antal, omkring 64, benytter en eller anden form af silphium, selvom det i nogle tilfælde er usikkert, om det er den ægte silphium eller erstatningen asafoetida, som har været brugt.

Harpiksen bruges i et bredt spektrum af opskrifter og i kombination med mange andre krydderier såsom peber, spidskommen og koriander.

En overraskende komplikation opstår, når man forsøger at tilberede gamle retter for eksempel med silphium. Stilen i disse gamle

opskrifter er meget forskellig fra moderne opskrifter, der typisk har detaljerede ingredienslister (med mål og vægt) og en udførlig beskrivelse af, hvordan man går frem trin for trin, inklusive specifikation af tid og temperatur.

De gamle opskrifter er blot en liste over ingredienser og har kun rudimentære kulinariske præciseringer, om nogen. Som et eksempel foreskriver Apicius følgende for en snegleret med silphium: "Steg dem i rent salt og olie. Hæld en sauce af laser (silphium), liquamen (fiskesauce), peber og olie over sneglene."

Det er alt. Der er heller ingen beskrivelse af, hvordan den resulterende ret skal smage. Dette udgør en udfordring for kokken, der er nødt til at angribe madlavning efter gamle opskrifter som en slags eksperimentel smagsarkæologi.

Der er her, vi kommer ind, fordi det er lykkedes os at få en prøve af harpiks fra *F. drudeana*, som vi nu har analyseret både i et moderne analytisk-kemisk laboratorium, i et særligt gastrolab og i et rekonstrueret romersk køkken som et samarbejde med en britisk eksperimentel smagsarkæolog, Sally Grainger. Det er især harpiksens aromatiske egenskaber, som vi har undersøgt i samspil med smagen af forskellige tilberedninger af mad og drikke.

Et væld af komplekse aromastoffer

Vores undersøgelse forløber i flere dele. Først bruger vi gaskromatografi-massespektroskopi til at identificere flygtige forbindelser i forskellige præparater af harpiksen. Dette kobles nu til en undersøgelse, hvor man i princippet forbinder den menneskelige næse til analyseinstrumentet. Dermed er det muligt at



korrelere specifikke kemiske forbindelser med sensoriske deskriptorer samt intensitet af lugten.

Ud over at identificere relevante flygtige stoffer giver disse undersøgelser os et grundlag for at vælge en passende koncentration (dosis) af harpiksen i de efterfølgende eksperimenter i både gastrolab og i det romerske køkken. I de gamle opskrifter står der jo ikke, hvor meget og på hvilken form, silphium skal anvendes i en ret.

Blandt de mange fundne stoffer er der nogle, som er med til at give harpiksen sin særlige aroma, som vi kan fortolke således: Pinen-isomerer giver en baggrund af nåletræ, suppleret af en jordagtig dybde af β -myrcen og en sød-grøn karakter af α -gurjunen, nuanceret af de nøddeagtige noter af pyraziner og det skarpe, urteagtige løft af IBMP (grøn peberfrugt). En tung baggrund af terpener tilføjer harpiksgtige nuancer.

Sensorisk bedømmelse med simple fødevarer

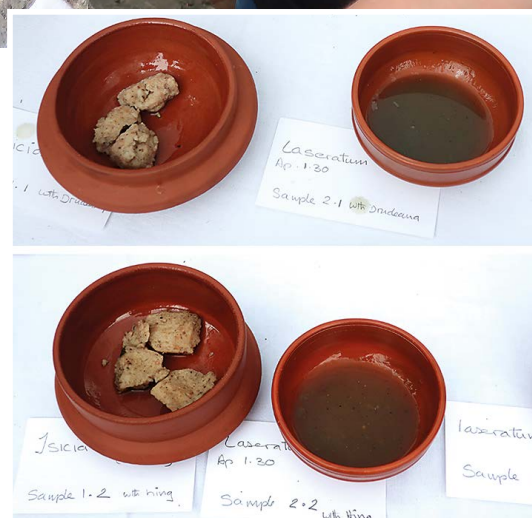
De gastrofysiske undersøgelser i gastrolab involverer tre forskellige, meget simple, flydende tilbered-

ninger: en suppebouillon, en te og en fiskesauce. Suppebouillon er *dashi*, som blev valgt, fordi det er den fødevarer med den reneste umami-smag, som fremkommer af glutamat udtrukket af *konbu*-tang. Teen blev valgt som et klassisk urteudtræk med en subtil bitterhed. Fiskesaucen (*garum*) blev valgt, da den er en vigtig umami-rig ingrediens i det antikke køkken, og den indgår som ingrediens i de fleste af Apicius' opskrifter.

I eksperimenterne blev harpiks fra *F. drudeana* tilsat de tre tilberedninger, og effekten på lugt og smag blev bedømt kvalitativt af en række smagsdommere.

For *dashi* tilsat harpiks beskrev dommerne smagen som "dybere", "mere afrundet" og med "længerevarende umami-fornemmelse", hvilket tyder på en synergi mellem harpiksens aromaer og umami-smagen.

For teen tilsat harpiks beskrev dommerne en forstærkning af teens kompleksitet og en afrunding af dens eftersmag, og flere dommere bemærkede specifikt en øget "sød-meagtig" smag på trods af ingen



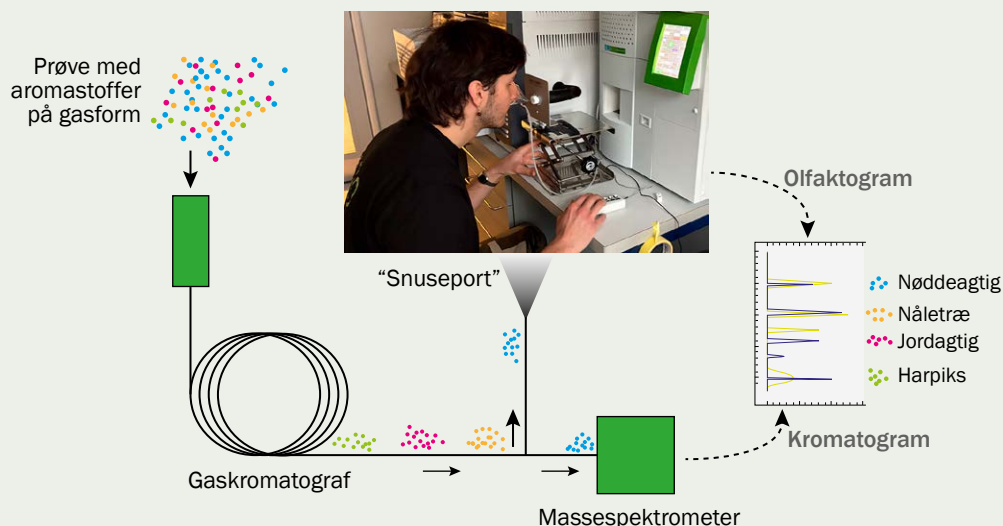
Sally Graingers eksperimentelle romerske køkken, hvor saucer og retter med *Ferula drudeana*-harpiksen blev tilberedt. På de andre billeder er vist smagsprøver med en sauce baseret på en to-tusindårig gammel opskrift med *F. drudeana*-harpiks (øverst) og med asafetida (dyvelsdræk) til farsboller (kendt som *isicia*) lavet af rejer og multe (nederst).

ændring i sukkerindholdet. Det tyder på, at harpiksens aromatiske aktive forbindelser kan modulere og undertrykke bitre noter og forstærke mere tiltalende smagsnuancer og derved skabe en integrerende synergi snarere end en simpel additiv effekt.

For fiskesaucen, som har en dyb og velmagende baggrund af salt og umami, forøger harpiksen den

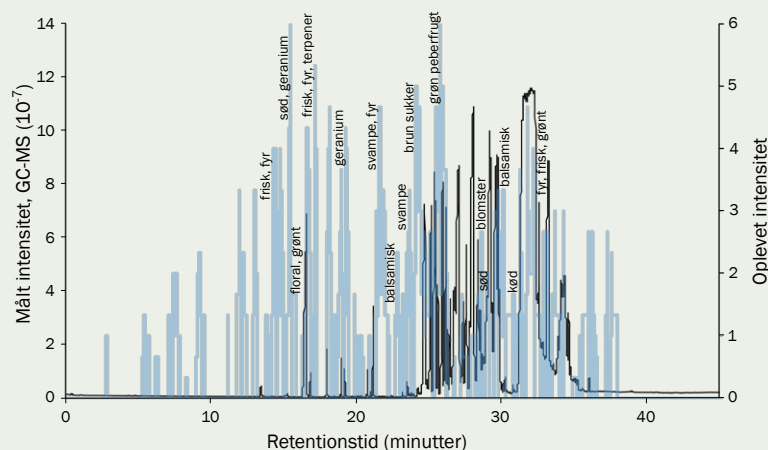
Fotos: Ole G. Mouritsen

Sådan identificeres aromastofferne



Når vi i laboratoriet vil identificere, hvilke aromastoffer der findes i forskellige præparater i harpiksen, foregår det som vist på figuren. Aromastofferne fra en prøve sendes på gasform gennem en gaskromatograf (GC), som gør det muligt at adskille aromastoffer i prøven og efterfølgende identificere dem ved hjælp af massespektrometri (MS). Dette sker samtidig med, at en person sniffer til stofferne, efterhånden som de kommer ud af kolonnen. Resultatet fra GC-MS er et såkaldt kromatogram, og resultatet af personens registrerede lugtindtryk og deres intensitet præsenteres i et såkaldt olfaktogram.

På figuren er kromatogrammet (sorte linjer) og olfaktogrammet (blågrå linjer) lagt oven på hinanden, hvilket gør det muligt samtidigt at identificere et stof i prøven (skalaen til venstre) og en persons lugtindtryk og dets intensitet på en skala fra 1-6 (skalaen til højre). Navne på de stoffer, som giver nogle af de mest intense lugtindtryk, er vist på olfaktogrammet. Den horisontale akse angiver den tid, et givet aromastof fra prøven er om at komme gennem kolonnen til massespektrometeret og samtidig til næsen.



aromatiske kompleksitet. Den lette bitterhed, der skyldes harpiksens sesquiterpen-laktoner, skærer effektivt igennem den intense salthed og de komplekse fermenterede noter og skaber en mere afrundet og behagelig smag.

Smagsarkæologi i laboratoriet og i et romersk køkken

Vi undersøgte først harpiksens effekt på en simpel ret ved i et gastrrolab at tilberede kål med en særlig sauce fremstillet af *garum*, pinjekerner og en infusion af harpiksen. Det overraskende resultat var, at saucen dæmper de svovlholdige, aggressive noter af kogt kål,

som nu indgår i et samspil med de pebrede noter (fra pinen-isomerer) og den nøddeagtige karakter (fra pyrazin-forbindelser) i harpiksen. Samlet set dæmpes oplevelsen af de bitre og svovlholdige forbindelser og giver "kålretten" en mere harmonisk og tilgængelig karakter.

Vores britiske samarbejdspartner Sally Grainger brugte i sit eget rekonstruerede romerske køkken en opskrift fra Apicius som grundlag for sine smagseksperimenter: Silphium-sauce: "Man opløser en kyrenæisk eller parthisk laser (silphium) i varmt vand blandet med eddike og liquamen (fiskesauce)."

Denne opskrift er til en sauce eller dip, der muligvis har været brugt til retter med kød, fjerkræ og grøntsager. Den oplevede smagsprofil af denne blanding viste tydelige grønne noter med genkendelige svampe- og peberfrugtnoter uden bitterhed.

Man må forestille sig, at simple saucer som denne, der blev brugt til at dyppe kød og grøntsager i, var designet til at fremhæve silphiums unikke smag, når den er bedst, uhindret af andre mere komplekse krydderier. Eksperimenter med at inkorporere harpiksen i mere komplekse saucer med flere krydderier

og urter var ofte mindre succesfulde, da den delikate smag gik tabt blandt de andre krydderier.

En eksperimentel smagning blev arrangeret med deltagelse en gruppe kvalificerede smagsdommere og madhistorikere, som fandt, at *F. drudeana*-harpiks har en subtil smag, der bedst værdsættes med simple retter, for eksempel sammen med hakkede kødretter. Harpiksens subtile smag druknede i mere fyldigere saucer og i kød, der har været tilberedt i lang tid.

Et særligt vigtigt resultat af disse smagsarkæologiske eksperimenter i relation til spørgsmålet, om *F. drudeana* kunne være silphium, er, at dens harpiks' sensoriske virkninger på retter tilberedt ifølge Apicius er markant forskellige fra identiske retter tilberedt med asafoetida (*F. assa-foetida*).

Uddød eller ej?

Resultaterne viser, at harpiksen kan fungere som en smagsforstærker især i relation til umami-smag, at den har en tendens til at dæmpe bitterhed, og at dens sensoriske virkninger er markant forskellige fra dem fra erstatningsharpiksen, asafoetida, der også blev brugt i romersk madlavning, især efter silphium var antaget uddød. Vores resultater af kulinariske undersøgelser af *F. drudeana* tilføjer yderligere indicier til, at denne skærmpolante er en god kandidat til en "genfundnen" silphium.

Det er dog fortsat uafklaret, om silphium-planten faktisk uddøde i det 1. århundrede. Der er også filosofiske spørgsmål relateret til, hvordan man definerer uddøen, hvordan man betragter en arts forsvinden og en mulig genopståen. Det kan være problematisk at analysere dette gennem et moderne perspektiv på biodiversitet og specificeret artsudryddelse. Biologi fortæller os, at store genetiske ændringer kan forekomme i en art over flere generationer, og afhængigt af miljømæssige omstændigheder kan den plastiske og funktionelle variation



i en art i princippet føre til, at en plante ændrer sig over tid og faktisk endda kan ændre sig tilbage, hvis forholdene ændrer sig. Er den så uddød i mellemtiden?

Denne diskussion er af afgørende betydning, når det kommer til kulinariske anvendelser af silphium, hvor menneskelig opfattelse af smags- og aromastoffer er vigtig. Hvordan kan vi være sikre på, at den nuværende genetiske sammensætning af *F. drudeana* fører til det samme arsenal af flygtige molekyler som den gamle silphium-plante? Og selvom dette er tilfældet, hvordan ved vi så, at den moderne menneskelige hedoniske reaktion på disse stoffer på nogen måde ligner den måde, gamle generationer opfattede disse stoffer på. Hele konceptet om velsmag og forestillingen om smags- og aromavurdering er i høj grad sociokulturelle konstruktioner.

Hvad kan vi så bruge det til?

Et endeligt bevis for, at *F. drudeana* faktisk er den forsvundne silphium, kan kun skaffes ved sammenligning af DNA-analyser af de to planter. Den eneste mulighed for at skaffe

DNA fra silphium er måske, at marinarkæologiske undersøgelser af skibsvrag på for eksempel Libyens kyst skulle støde på rester af silphium-harpiks i krukke i lasten.

Det er måske meget morsomt og af historisk interesse at forske i en kandidat for en muligvis uddød planteart. Men allerede nu har en interesse for *Ferula drudeana* på baggrund af interessen for silphium ført til fund af en række interessante bioaktive stoffer, som er af medicinsk og farmakologisk interesse.

Vores arbejde med kulinariske anvendelser af aromastofferne i denne plante har desuden vist, at der er en hidtil uudforsket sensorisk mekanisme, hvorved aromastoffer kan fremhæve umami-smag og undertrykke bitterhed. Denne mekanisme, hvis overført til andre planter med tilsvarende aktive aromastoffer, kan måske være med til at skubbe på den grønne omstilling ved med aromastoffer at forstærke den oplevede umami-smag i en planterig kost, som ikke har de smagsstoffer, der i sig selv giver umami. ■

Professor Mahmut Miski på Mount Hasan i Tyrkiet på et sted, hvor der er fundet *Ferula drudeana*. Foto: Mehmet Ata.

Ydere læsning

Agnini, G., Pedersen, M., Miski, M., Grainger, S., Petersen, M. A., Mouritsen, O.G. (2026): Ancient cuisine revisited: Aroma profiling of resin from *Ferula drudeana* — culinary potential and gastronomic applications of the putative silphium. *Int J Gastron Food Sci* 43:101422.

Briggs, L., Jakobsson, J. (2022): Searching for silphium: An updated review. *Heritage* 5, 936-955.

Miski, M. (2021): Next chapter in the legend of silphium: Preliminary morphological, chemical, biological and pharmacological evaluations, initial conservation studies, and reassessment of the regional extinction event. *Plants* 10:102.

Mouritsen, O. G., Styrbæk, K., Johansen) M. (2025): *Plant-Forward Cuisine: Basic Concepts and Practical Applications*, Routledge, London & New York, 296pp.

FORSKERE SÆTTER NANOMOTORER I BEVÆGELSE I KUNSTIGE CELLER

Bakterien *Listeria monocytogenes* skal helst ikke trænge ind i dine celler, for den kan gøre dig meget syg. Men nu har et forskerhold fra Aarhus Universitet brugt dens måde at bevæge sig på som inspiration til at bygge nanomotorer ind i kunstige celler.

Forfatter
Peter Gammelby er
journalist ved Aarhus
Universitet.
pfg@au.dk

Forskerne
Miguel Ramos-Docampo
er adjunkt
miramos@inano.au.dk

Brigitte Städler
er professor
bstadler@inano.au.dk

Begge ved Interdisci-
plinary Nanoscience
Center (iNANO), Aarhus
Universitet.

I ngen har endnu skabt en fuldt fungerende kunstig celle. Men et forskerhold ved Aarhus Universitet har taget et nyt skridt i den retning: De har udstyret kunstige celler med bittesmå motorer inspireret af en usædvanlig bevægelsesmekanisme i naturen. Resultatet er kunstige celler, der kan danne indre netværk af proteintråde – en funktion, som ellers kun findes i levende celler. Studiet er publiceret i *ACS Nano*.

Det særlige nanomotordesign er udviklet med inspiration fra bakterien *Listeria monocytogenes*. Inde i levende celler bevæger denne bakterie sig frem ved at danne lange tråde af proteinet actin (et strukturelt protein, der findes overalt i cellen), som skubber den fremad som en mikroskopisk raketmotor. Forskerne har efterlignet dette princip i nanoskala.

»Vi ville finde ud af, om nanomotorer – altså nanopartikler, der kan bevæge sig via actin-polymerisering – kunne hjælpe os med at opbygge en slags indre skelet i kunstige celler,« forklarer Miguel A. Ramos-Docampo, adjunkt ved Interdisciplinary Nanoscience Center (iNANO) på Aarhus Universitet. »Nanomotoren bruger en bevægelsesmekanisme, der er »opfundet« af naturen – men vi bruger den til et helt andet formål.«



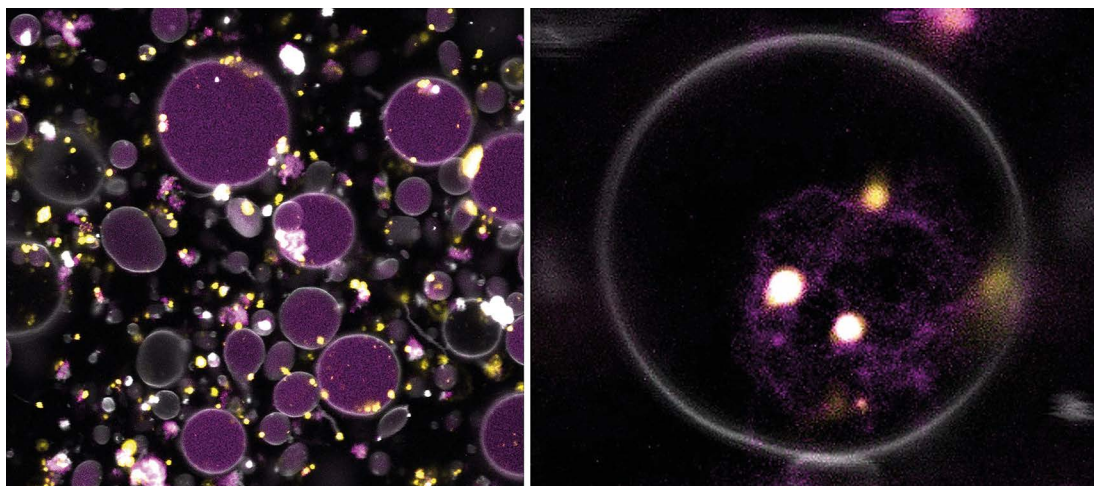
Forskerne Miguel Ramos-Docampo og Brigitte Städler. Foto: Peter Gammelby.

Motorer sætter gang i dannelsen af indre netværk

De kunstige celler består af vesikler – membranomgivne blærer med et flydende indre – hvori forskerne har indlejret nanomotorerne. På overfladen af motorerne blev actin-polymerisering aktiveret, så lange proteintråde voksede ud i alle retninger. Samtidig begyndte nanomotorerne at bevæge sig hurtigere, fordi actin-trådene skubbede dem frem – præcis som hos *Listeria*. Det resulterende netværk minder om cytoskelettet (cellens indre stillads

og transportsystem) i levende celler. Men i modsætning til naturlige celler, hvor bevægelse og organisering styres af komplekse biologiske signaler, bygger de kunstige celler og nanomotorerne på en langt simplere mekanisme.

»Vores kunstige celler bevæger sig ikke og organiserer sig ikke som rigtige celler. Men ved at genbruge *Listeria*'s fremdriftsstrategi kan vi skabe syntetiske systemer, der organiserer sig selv,« siger Brigitte Städler, professor ved iNANO.



Billederne viser kunstige celler med nanomotorer (til venstre) og til højre en forstørrelse af en enkelt af disse celler. De lysende gule områder er selve nanomotorerne, mens de lilla områder er actin-tråde. Billederne er taget ved hjælp af et såkaldt konfokal laserscanning mikroskop. Fotos: Miguel Ramos-Docampo.

Samarbejde på tværs af discipliner

Forskergruppen kombinerer ekspertise indenfor kemi, biofysik, nanoteknologi og matematik. Det tværfaglige samarbejde har været afgørende for at forstå og modellere, hvordan de små motorer bevæger sig og organiserer sig inde i de kunstige celler.

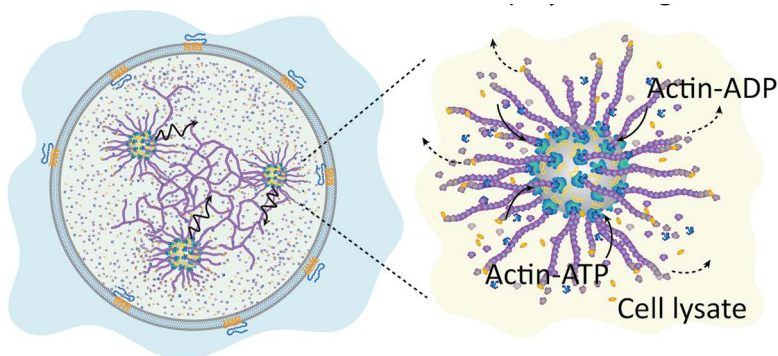
Forskerne har især brudt ny grund ved at forene to forskningsfelter, der normalt ikke undersøges sammen:

- Kunstige celler, som er et kerneområde i bottom-up syntetisk biologi, og
- Nanomotorer, som normalt hører hjemme inden for forskningen i aktivt stof (systemer, der kan bevæge sig af egen kraft).

»Levende systemer er ekstremt komplekse,« siger Brigitte Städler. »At efterligne selv en lille del af deres adfærd kræver, at man kombinerer eksperimenter, teoretisk modellering og nanoteknologisk design. Dette arbejde viser, hvordan bevægelse og strukturel organisering kan kobles i ét samlet system.«

På vej mod selvorganiserende, menneskeskabte celler

I levende celler er cytoskelettet en dynamisk struktur, der konstant dannes og nedbrydes. Den kunstige version er stadig langt fra dette kompleksitetsniveau, men studiet viser, hvordan bevægelse og intern



Skematisk illustration af forsøgsprincippet. Til venstre ses en kunstig celle (vesikel), som indeholder nanomotorer, der sætter gang i dannelsen af actin-tråde og opbygger et netværk, der minder om cellens cytoskelet. Til højre ses en forstørrelse af en enkelt nanomotor. Actin-ATP er actin bundet til energimolekylet ATP og indbygges i voksende tråde, mens actin-ADP udgør ældre dele af tråden. De stiplede linjer viser, at actin-trådene vokser ud i cellens indre.

Sådan bevæger *Listeria monocytogenes* sig

Bakterien *Listeria monocytogenes* bevæger sig inde i levende celler ved at udnytte cellens eget maskineri. Bakteriecellen danner tråde af proteinet actin, som vokser bag bakterien og skubber den frem – som en lille biologisk raket. Denne såkaldte "actin comet tail"-mekanisme inspirerer forskere til at udvikle nanomotorer, der kan bevæge sig og organisere sig på lignende måde – men uden at være levende eller smitsomme.

organisering kan opstå i syntetiske systemer.

»Det her er et tidligt skridt, men det hjælper os med at forstå, hvad der skal til for at efterligne selv en lille del af cellens funktion,« siger Miguel Ramos-Docampo. »Det viser, at man kan opbygge funktionalitet nedefra – uden at kopiere hele biologien.«

Forskerne arbejder nu videre med at designe kunstige celler, der ikke

bare kan danne indre strukturer, men også reagere på omgivelserne eller interagere med levende celler.

»Vi forsøger ikke at genskabe liv,« siger Brigitte Städler. »Vi prøver at forstå og efterligne udvalgte livsliggende funktioner. Vores kunstige celler er enkle og stabile, og vi kan programmere deres opførsel. Det åbner nye muligheder – både for grundvidenskabelig indsigt og fremtidige teknologier.«



Jule på kemiholdet

Af Carsten R. Kjaer, *Aktuel Naturvidenskab*

Hvis man skal forestille sig en enkelt genstand, der signalerer "kemiker", vil de fleste nok pege på en glaskolbe. Glaskolber – og alverdens andet udstyr af glas – har da også været helt uundværlige redskaber for kemikere gennem tiden. Selv i dag, hvor meget af den kemiske forskning for længst er rykket ind i computerens digitale verden, vrirler det med glaskolber i de kemiske forskningslaboratorier.

Derfor er der også stadig brug for folk, der kan lave lige præcis den specielle glaskolbe, man står og mangler til sine kemiske eksperimenter. Og det kan 28-årige Jule Janssen fra Tyskland. Hun er nemlig teknisk glasblæser, og i august sidste år blev hun ansat på Institut for kemi ved Aarhus Universitet. Her afløste hun Chris Kondrup, som i sin lange karriere på instituttet havde gjort sig uundværlig for både forskere

og studerende. Ligesom sin forgænger er Jule nu den eneste tekniske glasblæser i Danmark, som er ansat på et universitet.

For forskerne er værdien i en teknisk glasblæser på instituttet ikke kun, at de kan få repareret deres dyre glasudstyr eller hurtigt og effektivt at få lavet udstyr på bestilling. Det er også adgangen til en sparringspartner, der kan hjælpe dem med at udvikle helt nye glasrør, kolber, beholdere mv. Det har alle dage været et vilkår, at fremskridt i forskningen kan være begrænset af det tilgængelige udstyr. Og at teste nye kemiske ideer kræver nogle gange, at man må opfinde både metode og udstyr til lejligheden. I den forbindelse er det sjældent, at man finder en forsker og en teknisk glasblæser i en og samme person. Derfor er forskning som regel en holddisciplin – nu med Jule på kemiholdet i Aarhus.

Kilde: chem.au.dk ■