

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI  
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL  
*natur* **VIDENSKAB**

**PLANETBANER**

– og stjernesystemers historie

Liv baseret på silicium i stedet for kulstof?

Hvad dør danskerne af?

Mikroplast fra bildæk

NR.5 - 2021 NOVEMBER: 50 KR.

# NOTER

## Videnskabsmænd er også kvinder

I en ny podcastserie med titlen *Videnskabsmænd er også kvinder* fortæller fem kvindelige forskere fra Aalborg Universitet (AAU) om at gøre karriere i forskningsverdenen, hvor der er næsten dobbelt så mange mænd som kvinder.

Kilde: [update.aau.dk](http://update.aau.dk)



## Stjernebig og astronomiske samtaler

Observatoriet på toppen af Rundetårn er nu igen åbnet efter corona-nedlukningen, så man hver tirsdag og onsdag aften i vinterhalvåret kan kigge ud i verdensrummet gennem den store linsekikkert fra 1929. Desuden vil man den første onsdag i måneden gennem hele vinterhalvåret kl. 19.00 kunne krydre stjernebiggeriet med spændende foredragsholdere og stemningsfuld musik i den nye satsning *Stjernebig og astronomiske samtaler*. Se hele programmet på [rundetaarn.dk](http://rundetaarn.dk)



Foto: Colourbox

## Hjælp med at kortlægge flåter

På hjemmesiden [flaetinfo.dk](http://flaetinfo.dk) kan du nu hjælpe forskerne med at kortlægge problemet med skovflåter i Danmark. Her kan du melde observationer om flåter på både mennesker og kæledyr ind, og du kan angive, om flåten blot har kravlet på dig, eller om den har bidt sig fast. Du kan også uploade et foto af udslæt efter et flåtbid, hvis du har fået sådan et. Forskerne bag er Karen Angeliki Krogfelt og Mette Frimodt Hansen fra RUC, der skrev om flåter i *Aktuel Naturvidenskab* nr. 3/2021.

Kilde: RUC

## Grundtanker i ny sæson

Videnskabernes Selskabs podcastserie *Grundtanker* er for nylig udkommet i 2. sæson. I hver episode af *Grundtanker* fortæller en fremtrædende dansk forsker om et hjørne af det samfund, vi lever i. I denne sæson kan du for eksempel høre overlæge Bente Klarlund Pedersen fortælle om, hvad den nyeste forskning siger om vigtigheden af motion og forskningsdirektør på Carlsberg Laboratorium Birgitte Skadhauge fortælle om videnskaben bag ølbrygning. Podcasten kan findes på samtlige gængse platforme.

Kilde: *Videnskabernes Selskab*



© Gil Wizen

## Oplev verdens bedste naturfotos

Den årligt tilbagevendende fotokonkurrence Wildlife Photographer of the Year er verdens største af sin slags og naturfotografernes svar på Oscar-uddelingen. Denne vinter kan du opleve de 100 bedste billeder af natur og dyreliv kåret i 2021, når Statens Naturhistoriske Museum i København igen er dansk vært for udstillingen. Billedet viser en sabethes-myg, mens den stikker fotografen, Gil Wizen, som i stedet for at verfe myggen væk fandt sit kamera frem.

Kilde: *Statens Naturhistoriske Museum*

## Quizen

Hvad forstår man ved en såkaldt "Hot Jupiter"?

1. En exoplanet med en størrelse cirka som planeten Jupiter, men som kredser i en bane meget tæt på dens stjerne.
2. En lille stjerne, der ikke er meget større end Jupiter.
3. Gasplaneter der bliver meget varme på grund af radioaktive processer i deres kerne.

Find svaret i artiklen side 8 til 12.



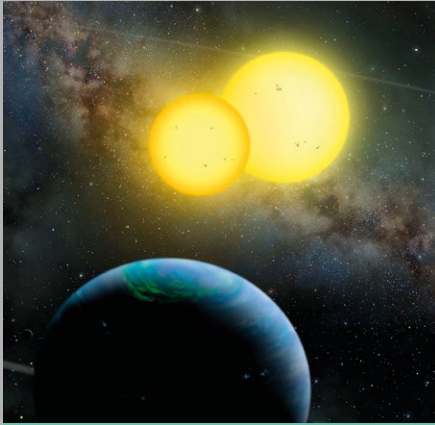
## Dygtige danske hackere

Det danske Cyber-landshold opnåede en flot 5. plads ved European Cyber Security Challenge – europamesterskabet i hacking – i september måned i Prag. Det er sjette gang konkurrencen bliver afholdt, og det danske landshold bestod af 10 deltagere, der var udvalgt efter en proces med både regionale og nationale mesterskaber. Tyskerne løb med sejren dette år, men det var første gang, at Danmark blandede sig i top 5.

Kilde: [cmi.aau.dk](http://cmi.aau.dk)



# indhold



Hvordan opstår stjerner og deres tilhørende planeter, og hvordan ender planeterne i deres baner om stjernen? Det er spørgsmål, som astrofysikeren Simon Abrecht forsøger at besvare ud fra observationer af stjerner og planeter i vores galaktiske nabolag.

8



Bildæk er en stor kilde til mikroplast i miljøet – både når dæk slides ved kørsel, når de genbruges til for eksempel kunstbaner, eller når de repareres. Et dansk/kinesisk forskerhold har nu forsøgt at danne sig et overblik over, hvad man ved om plastpartiklerne og deres effekt på dyr og mennesker.

24



Grundstoffet silicium ligner kulstof på flere måder, og det har fået forskere til at spekulere over, om liv på fjerne planeter kunne være baseret på silicium i stedet for kulstof som her på Jorden. Hvorfor det i praksis ikke kan lade sig gøre, får vi forklaringen på her.

15



Hvert år dør over 50.000 danskere. Med udgangspunkt i offentligt tilgængelige statistikker kigger vi her på, hvad disse kan fortælle om døden i Danmark.

30

## FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 8 Uventede planetbaner kan afsløre stjerners historie
- 13 Styr på det komplekse
- 15 Liv baseret på silicium i stedet for kulstof – en død sild
- 18 Tornadoer – lokale, voldsomme og uforudsigelige
- 24 Mikroplast fra dæk – hvor stort et problem er det?
- 30 Hvad dør danskerne af? Dødsårsager i et dataanalytisk perspektiv
- 36 Helium-nanodråber og frielektronlasere – det perfekte match
- 43 Service
- 44 BAGSIDEN: Hot forskning

## AKTUEL NATURVIDENSKAB

### Udgiver

Aarhus Universitet, Faculty of Natural Sciences og Faculty of Technical Sciences, i samarbejde med:

- Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- Det Naturvidenskabelige Fakultet og Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet og Det Tekniske Fakultet for IT og Design, Aalborg Universitet
- Roskilde Universitet

### Ansvarshavende

David Lundbek Egholm, prodekan ved Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet.

### Redaktion

Redaktører Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard  
Tlf.: 87 15 20 94

E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk



AALBORG UNIVERSITET



AARHUS  
UNIVERSITET



KØBENHAVNS  
UNIVERSITET



DET NATURVIDENSKABELIGE  
FAKULTET



DET TEKNISKE  
FAKULTET



Roskilde Universitet

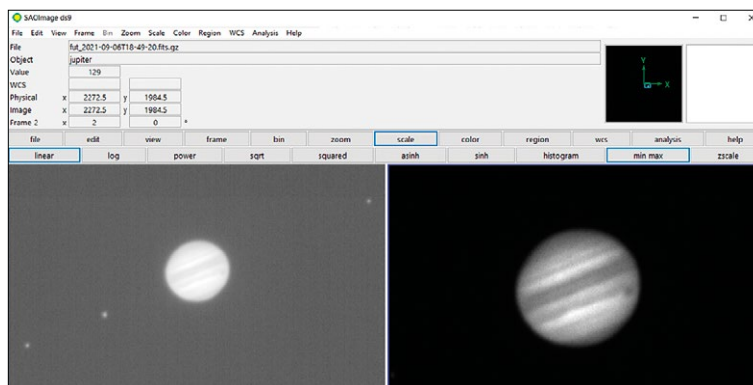
SPONSOR-  
ABONNENTER



novo nordisk®

# Fjernstyret teleskop i undervisningen

**P**å en bjergtop i Australien står et 60 cm spejleteleskop med digitalt kamera, som kan fjernstyres her fra Danmark. Det er forskere fra Stellar Astrophysics Center ved Aarhus Universitet, som har opstillet teleskopet med det formål at kunne stille det til rådighed for gymnasieklasser i undervisningen i Astronomi C og Fysik C, B og A. Det Fjernstyrede UndervisningsTeleskop (FUT), som det kaldes, er finansieret af Novo Nordisk Fonden, og det befinder sig mere præcist på



Observation af planeten Jupiter med FUT.

Mt. Kent observatoriet tæt ved byen Toowoomba i det sydlige Queensland, Australien. Med teleskopet vil hold af gymnasieelever

i den almindelige undervisningstid i Danmark kunne foretage egne astronomiske observationer af nattehimmelen set fra Australien. Adgang til teleskopet er gratis, og man kan få adgang ved at oprette en brugerkonto via den tilhørende hjemmeside [fut.phys.au.dk](http://fut.phys.au.dk) Her kan man følge med i teleskopets aktuelle observationer mens de foretages, prøve observationsprojekter med allerede optagede billeder, og meget snart selv søge om egen observationstid.

CRK

## Astronomer ser den samme supernova tre gange

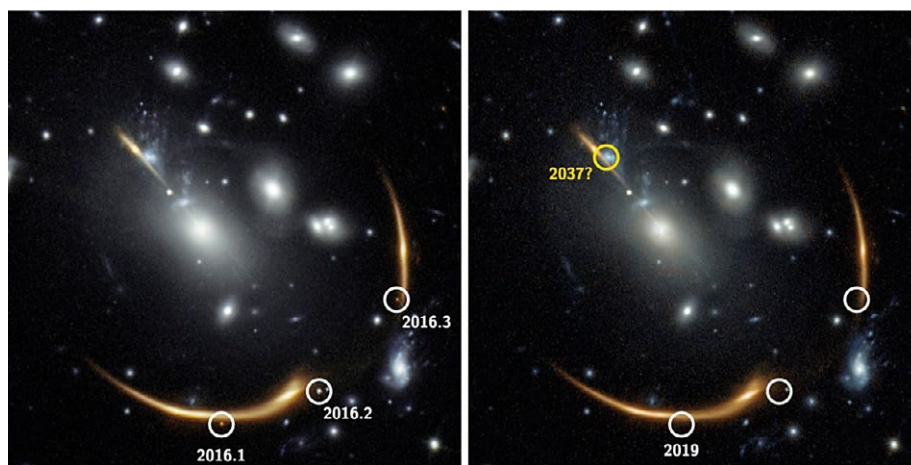
**A**stronomer fra blandt andet Københavns Universitet har set den samme supernova eksplodere tre forskellige steder på himlen. Noget, der ikke burde kunne lade sig gøre, men som alligevel er muligt gjort i kraft af et helt særligt rumfænomen.

De tungeste strukturer i universet — galaksehobe med

hundreder eller tusinder af galakser — kan nemlig afbøje lys fra fjerne, bagvedliggende galakser så meget, at de ser ud til at ligge et helt andet sted, end de gør.

Og ikke nok med det: Lyset kan tage flere forskellige veje rundt om galaksehoben, så vi kan være heldige at se to eller flere billeder af samme galakse flere forskellige steder på himlen gennem et kraftigt teleskop.

Det fænomen gjorde astronomerne i stand



Til venstre ses et billede af galaksehoben MACS J0138 fra 2016, hvor lyset fra den samme eksploderende stjerne ses tre steder på himlen. Til højre ses samme område i 2019, hvor stjernen nu er væk, men astronomerne har beregnet, at den vil dukke op igen i år 2037. Foto: S. Rodney (U. of S. Carolina), G. Brammer (Cosmic Dawn Center), J. DePasquale (STScI), P. Laursen (Cosmic Dawn Center).

til at se supernovaens eksplosion, der skete for 10 milliarder år siden, på tre ud af fire "spejlbilleder" af galaksen, som de kunne se på himlen.

Fordi lyset i disse tre billeder er ankommet med et par måneders forskydelse, giver de os tre forskellige syn på udviklingen af eksplosionen. I det sidste billede er supernovaen endnu ikke eksploderet. Men ved at undersøge, hvordan galakserne ligger fordelt i galaksehoben, og hvordan billederne er

forvrænget af det krumme rum, er det faktisk muligt at beregne, hvor langt "bagud i tid" dette billede er.

På denne måde har astronomerne været i stand til at komme med en bemærkelsesværdig forudsigelse.

»Det fjerde billede af galaksen er cirka 21 år bagud, og vi bør derfor se supernovaen eksplodere en gang til omkring år

2037,« forklarer Gabriel Brammer, der er lektor på Cosmic Dawn Center på Niels Bohr Institutet og den ene leder af undersøgelsen.

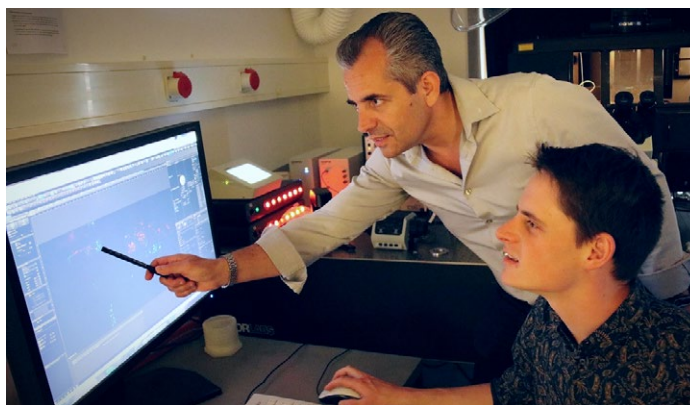
Observationerne af supernovaen med kalde navnet SN-Requiem blev udført med rumteleskopet Hubble i et samarbejde mellem Københavns Universitet, DTU Space og en række internationale partnere.

Af Michael Skov Jensen, KU, *Nature Astronomy*, sept. 2021



# Proteiners adfærd afsløres af deres bevægelse

**A**fgørende processer i vores kroppe er kontrolleret af proteiners bevægelser. Det kan være proteiner, der bevæger sig langsommere, når de fremkalder kræft, proteiner som er gode til at dræbe bakterier ved hurtigt at bevæge sig ind i organismen, eller proteiner som transporterer lægemidler gennem vores tarmsystem.



Nikos Hatzakis (stående) og Henrik Pinholt studerer proteinbevægelser ved hjælp af kunstig intelligens. Foto: Nikos Hatzakis

Men bevægelserne er enormt svære at tolke på. Ved brug af kunstig intelligens har forskere fra Københavns Universitet dog demonstreret, at de kan udpege både "slyngler" og "helte" blandt molekylerne i vores celler alene ud fra deres bevægelsesmønster.

»Vores algoritme tracker proteinets bevægelse og laver en karakteristik af hvert protein, som gør, at vi med stor nøjagtighed kan forudsige, hvad proteinet er god eller "slem" til – for eksempel om det arbejder effektivt eller bare sover, og om det får kræft til at opstå. Metoden åbner for bedre kontrol over vigtige

biologiske processer,« siger lektor Nikos Hatzakis fra Kemisk Institut.

At bestemme biomolekyler evner ud fra en automatiseret analyse af deres bevægelser er en helt ny tilgang.

»Før skulle man sidde og observere hver enkelt bevægelse hos proteinet og derefter pløje gamle modeller og teorier igennem for at kunne tolke på bare ét proteins bevægelser. Det er tidskrævende, dyrt og giver

risiko for fejl. Derudover skulle forskere lave lange matematiske analyser for at knække koden til koblingen mellem bevægelse og en biologisk funktion,« siger Henrik Pinholt, førsteforfatter og kandidat fra Kemisk Institut.

Metoden foregår ved, at en algoritme ud fra mikroskopbilleder af proteinets bevægelser udarbejder en præcis karakteristik af proteinet, der består af 17 forskellige egenskaber i proteinets bevægelsesmønster, blandt andet hvor hurtigt det bevæger sig, og hvilke "gangarter" det har. Når algoritmen er trænet, kan den forudsige proteiners adfærd med over 90 procent nøjagtighed.

Indtil videre har forskerne med succes brugt den til at forudsige proteinadfærd i tre forskellige biologiske systemer: transkriptionsfaktorer, lipaser samt proteiner på overfladen af nanopartikler.

Maria Hornbek, KU, PNAS 3. August 2021, 118 (31)

## Trafikstøj øger risikoen for demens

**H**vis du over en længere periode bliver udsat for støj fra en nærliggende vej eller jernbane, har du en markant højere risiko for at udvikle demens. Og jo højere støjen er, jo mere stiger risikoen for, at du udvikler demenssygdomme. Det viser et stort dansk forskningsprojekt, hvor forskere fra Syddansk Universitet sammen med forskere fra Roskilde Universitet, Odense Universitetshospital og Københavns Universitet har påvist en sammenhæng mellem støj og udvikling af demenssygdomme som Alzheimers.

Forskningsresultatet, som for nylig er publiceret i tidsskriftet *British Medical Journal*, viser blandt andet, at man har en 27 procent forhøjet risiko for at udvikle Alzheimers og 18 procent forhøjet risiko generelt for at udvikle demens, hvis man over en årrække eksponeres for trafikstøj over 55 decibel. Det betyder konkret, at ud af 8.475 demenstilfæl-



Foto: Colourbox

de i 2017 kan de 1.216 knyttes til trafikstøj. Forskningsprojektet bygger på sundhedsdata fra knap to millioner danskere sammenholdt med adresse og boligforhold i perioden 2004 til 2017. Det er første gang, at der er dokumenteret en sammenhæng mellem trafikstøj og udvikling af demens.

Mulige forklaringer på en effekt af støj på helbredet omfatter frigivelse af stresshormoner og søvnforstyrrelser, der fører til en type koronararteriesygdom, ændringer i immunsystemet og betændelse – som alle ses som tidlige begivenheder i begyndelsen af demens og Alzheimers sygdom.

Ifølge forskerne bag undersøgelsen giver de nye resultater os potentielt nye muligheder for at forebygge demens. Cirka 30 procent af alle danskere er nemlig udsat for vejstøj, der overstiger Miljøstyrelsens grænseværdi på 58 decibel. Det kræver, at man tager højde for det i byplanlægning, og når man skal gøre brug af støjregulering som afskærmning ved motorveje, støjdempende asfalt eller nedsættelse af farten på strækninger.

CRK, Kilde: SDU

# Ny teknik fjerner pesticidrester fra drikkevand

**D**e færreste ønsker rester af pesticider, hormoner og kemiske stoffer i vandet, men de kan ofte påvises.

»Vi bliver bedre til at finde mindre koncentrationer. Der er faktisk en del rester fra for eksempel medicin, pesticider, kosmetik og sæbe. Koncentrationerne er meget små og kaldes mikroforurening. De udgør måske ikke nogen direkte, umiddelbar trussel, men vi kender ikke langtidseffekten,« siger James McPherson, postdoc på Institut for Kemi, Farmaci og Fysik på Syddansk Universitet, der sammen med blandt andet professor Christine McKenzie, samme sted, har udviklet en ny metode til at rense vand for mikroforurening.

Traditionelt renses meget drikkevand med klor, og det dræber alle mikroorganismer i vandet, så det ikke længere kan overføre sygdomme, men klor kan ikke løse mikroforureningsproblemet. Ideen bag forskernes nye teknik er lige så simpel, som den er kompleks: Langt størstedelen af mikroforurening er kulstofbaseret. Så i princippet gælder det "bare" om at slå alle kulstofmolekyler i vandet ud. Desværre er det ofte sådan,



Foto: Colourbox

at det kræver mange ressourcer og skaber mere forurening at slå kulstofmolekylerne i vand i stykker.

Ikke desto mindre er det en vej, som mange forskere forfølger. For hvis/når det engang lykkes at finde en effektiv kulstofdræber, ligger vejen åben for simpel og billig vandrensning.

Forskerholdet metode går ud på først at tilsætte natriumbikarbonat og salt til vand, der indeholder pesticidrester eller anden mikroforurening. Hvis vandet ikke allerede indeholder hypoklorit (klor, som bruges til de-

sinificering af vand), skal det også tilsættes, og så kommer den afgørende ingrediens: En jern-katalysator, som forskerne har udviklet. Jern-katalysatoren finder hypoklorit-molekylerne og reagerer med dem først, hvorved der dannes en stabil harmløs kloridion og et reaktivt jern-oxygen-molekyle. Dette angriber bindingerne mellem kulstof- og brintatomer i de molekyler, der indeholder kulstof.

Forskerholdet har testet teknikken på met-aldehyd, som er forbudt i Danmark og en række andre lande, fordi det med en halveringstid på 17 år er meget længe om at forsvinde fra naturen.

»Det tog os cirka en uge at nedbryde tre fjerdedele,« fortæller McPherson.

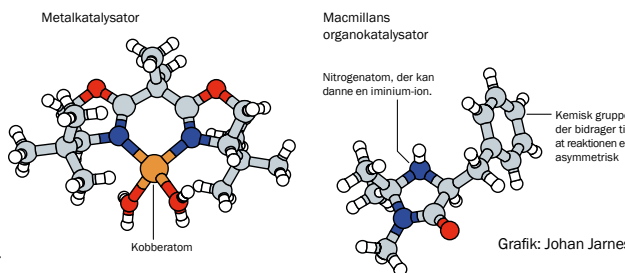
Det er imidlertid hverken let at lave eller genbruge det molekyle, som forskerne bruger til at angribe kulstofmolekylerne, og derfor forestår der en del forsknings- og udviklingsarbejde før forskerholdets teknik kan blive at finde i rensningsanlæg og vandværker.

Af Birgitte Svennevig, SDU. Kilde: J. Am. Chem. Soc. 2021, 143, 37, 15400–15412

## Katalyse i nobelprisklassen

**N**obelprisen i kemi er i 2021 gået til forskere, der har beskæftiget sig med katalyse – nærmere betegnet såkaldt organokatalyse. En katalysator er som bekendt et molekyle, der kan fremme en kemisk reaktion uden selv at blive omdannet eller forbrugt i reaktionen. Katalysatorer er helt fundamentale redskaber for kemikere og en milliardforretning for mange virksomheder. Udvikling af nye og effektive katalysatorer anses også for at være en af nøglerne til den grønne omstilling.

I mange år mente forskerne, at der kun fandtes to forskellige typer af katalysatorer: metaller og enzymer, hvor den sidste er biologiske organismers måde at katalysere reaktioner på. Årets nobelpristagere i kemi, tyskeren Benjamin List og briten David MacMillan, udviklede i år 2000 uafhængigt af hinanden en tredje type katalytisk proces kaldet asymmetrisk organokatalyse, som er baseret på små organiske molekyler.



Organiske katalysatorer har et stabilt skelet af carbonatomer, som mere aktive kemiske grupper kan binde sig til. Disse består ofte af almindelige atomer som oxygen, nitrogen, svovl eller fosfor, hvilket betyder at denne type katalysator både er miljøvenlige og billige at fremstille. Når de organiske katalysatorer hurtigt er blevet meget populære, skyldes det deres evne til at fremme asymmetriske reaktioner. Mange kemiske reaktioner munder ud i et produkt, der består af to spejlbilledformer af den samme kemiske forbindelse. De to spejlbilledformer af molekylet består altså af nøjagtig de samme atomer, men de er rumligt

MacMillan arbejdede med metalkatalysatorer, der let blev ødelagt af fugt (venstre). Han udviklede derfor simple og mere stabile molekyler, der kan danne funktionelle kemiske grupper kaldet iminium-ioner. En af disse viste sig at være god til asymmetrisk katalyse.

Grafik: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

forskellig nøjagtig lige som højre og venstre hånd. Men de to spejlbilledformer kan have vidt forskellig biologisk virkning i en organisme, og det er et problem, hvis der er tale om et lægemiddel. Derfor er det vigtigt at kunne producere udelukkende den udgave af molekylet, der har den ønskede virkning. Og det kan man med de organiske katalysatorer.

De to Nobelpristagere har gennem tiden demonstreret, at organiske katalysatorer kan anvendes til at drive en lang række forskellige reaktioner.

CRK, Kilde: nobel.se



# Halm, hør og tang som fremtidens byggematerialer

**N**år vi ser på det store klimaregnskab i verden, er byggeri en stor og ressourcekrævende synder. Samtidig er mange byggematerialer ikke genanvendelige, og ressourcerne, der bruges på at fremstille dem, er enorme. Derfor er det afgørende at finde nye veje.

En af de veje kan være at benytte såkaldte biogene byggematerialer. Det kan bestå af etårig biomasse som eksempelvis hør og flerårig biomasse som træ. Det kan også være akvatiske ressourcer som eksempelvis siv og tang. De biogene materialer binder kulstof i væksten og er dermed naturligt med til at høste CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. Et nyt forskningsprojekt skal nu undersøge, hvilke biogene materialer der rent faktisk kan benyttes i forbindelse med byggeri, hvordan de bruges mest optimalt i byggebranchen, og hvordan de vil kunne produceres i tilstrækkelige store mængder her i Danmark. Og ikke mindst med hvilke konsekvenser for eksempelvis biodiversitet, miljø, eksisterende arealanvendelse og for øvrige byggematerialer, som allerede produceres nationalt.



Torben Valdbjørn Rasmussen fremviser et element bestående af letvægtsplader af krydsfiner med en kerne af strå. Foto: Carina Liesk

Forskningsprojektet skal munde ud i en Grøn bog, der med ny viden på området vil kunne skubbe til den grønne omstilling i byggebranchen, så hele værdikæden indenfor både genanvendelse og produktion af nye, biogene materialer kommer i spil.

»I fremtiden skal vi høste, lagre og genanvende kulstof. Naturen kan høste, og

byggeriet er et stort uudnyttet lager for nye og genanvendte materialer. Lige nu er der meget fokus på træ i byggeriet, men det er ikke den eneste vej, vi kan gå for at opnå et mere bæredygtigt byggeri. Byggebranchen har brug for konkret viden om, hvad morgendagens bæredygtige byggeprodukter er. Vi vil hjælpe branchen med at kunne gentænke måden, man bygger på og skabe et massivt fokus på de byggetekniske og arkitektoniske potentialer, som naturens egne fornybare materialer tilbyder,« siger seniorforsker og ph.d. Torben Valdbjørn Rasmussen fra instituttet BUILD på Aalborg Universitet.

Projektet er et samarbejde mellem instituttet BUILD ved Aalborg Universitet, Københavns Universitet, Aarhus Universitet, Det Kgl. Akademi – Arkitektskolen, Videncenteret Træinformation og brancheorganisationerne Dansk Skovforening og Træ- og møbelindustrien. Projektet er støttet af Realdania.

Carina Liesk, Aalborg Universitet

## Bliv studerende for en dag



Som **Studerende for en dag** følger du undervisningen på den uddannelse, du er interesseret i. Du spiser frokost med en studerende, som viser dig rundt - og så bliver du klogere på, om uddannelsen er den rigtige for dig.

Besøg Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Matematik eller Matematik-Økonomi på SDU i Odense.

Tilmeld dig på [sdu.dk/nat/studerendeforendag](https://sdu.dk/nat/studerendeforendag)



Hvordan opstår stjerner og deres tilhørende planeter, og hvordan ender planeterne i deres baner om stjernen? Det er spørgsmål, som astrofysikeren Simon Albrecht forsøger at besvare ud fra observationer af stjerner og planeter i vores galaktiske nabolag.

Dobbeltstjerner – det vil sige, hvor to stjerner kredser om hinanden – er formentlig et meget almindeligt fænomen i Universet, og måske en del af forklaringen på, hvorfor mange af exoplaneternes baner umiddelbart opfører sig meget anderledes, end vi kender det fra vores eget Solsystem. Her er det en kunstnerisk gengivelse af exoplaneten Kepler-35, en planet på størrelse med Saturn, der netop kredser om et par af stjerner.

Illustration: Lynette Cook / extrasolar.spaceart.org

#### Om forfatteren

Af Henrik Bendix, videnskabsjournalist. bendix@vidmere.dk



**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 professor ved Københavns Universitet, Henrik Grum Kjærgaard. Læs mere på [www.dff.dk](http://www.dff.dk)

# UVENTEDE PLANETBANER KAN AFSLØRE STJERNESYSTEMERS HISTORIE

**E**xoplaneter, altså planeter om andre stjerner end Solen, kredser ikke altid pænt rundt om deres stjerne. De kan være langt fra at have næsten cirkulære baner parallelt med stjernens ækvator. I stedet kan planeternes baner være orienteret på alle mulige måder og være mere aflange, end vi kender det fra Solsystemet.

Det er lidt af et mysterium, som lektor Simon Albrecht fra Stellar

Astrophysics Centre på Aarhus Universitet gerne vil være med til at løse. Han er sikker på, at en del af forklaringen på de underlige planetbaner skal findes hos dobbeltstjerner. I 2015 fik han en Sapere Aude-bevillingen på 5,4 millioner kroner fra Danmarks Frie Forskningsfond, og de penge er gået til at forske i dannelsen og udviklingen af stjernesystemer med særligt fokus på forholdet mellem rotationsakser og kredsløbsretninger.

»Solen er den eneste stjerne i Solsystemet, men cirka halvdelen af alle stjerner på himlen tilhører dobbeltstjerner, hvor to stjerner kredser om hinanden. Vi vil gerne vide mere om, hvordan disse systemer blev dannet,« fortæller Simon Albrecht og fortsætter:

»Desuden forsker jeg i exoplaneter – hvordan systemer med planeter dannes og udvikler sig.«

I 1995 blev den første exoplanet,



51 Pegasi b, fundet, og den viste sig at være en gaskæmpe som Solsystemets største planet Jupiter, som kredser rundt ganske tæt på sin stjerne. 51 Pegasi b er blot fire dage om at kredse en omgang rundt om sin stjerne, som den er mindre end otte millioner km væk fra.

Sådan en "hot Jupiter" burde ikke kunne eksistere, for i en så kompakt bane tæt på stjernen har der simpelthen ikke været nok materiale til at danne en kæmpeplanet. Desuden burde strålingen fra stjernen have forhindret dannelsen af så stor en planet, idet varmen ikke tillader ispartikler af vand, metan eller ammoniak at eksistere og bidrage til væksten.

De varme gaskæmper må derfor være dannet længere væk fra stjernen og bagefter have migreret indad i en proces, som astrofysikere som Simon Albrecht kæmper med at forstå. Sammen med en lille gruppe studerende har han brugt de forløbne år på at undersøge og beskrive en række systemer for bedre at kunne forklare, hvordan stjernerne og planeterne kan ende i de baner, de har om hinanden.

I dag, hvor der er fundet langt over 4.000 exoplaneter, står det helt klart, at exoplaneter kan kredse rundt om stjerner på en mangfoldighed af uventede måder. Nogle af dem kredser endda modsat stjernens rotation. Den protoplanetari-ske skive af gas og støv, som planeterne blev dannet af, kredsedes sandsynligvis pænt rundt parallelt med den unge stjernes ækvator ved systemets fødsel, så spørgsmålet er, hvad det er for nogle mekanismer, der i dén grad kan ommøblere systemerne.

### Banehældning kan skyldes nabostjernen

Når omløbstiden om en planet kendes, er det ligetil også at udregne dens gennemsnitlige afstand til stjernen (den halve storakse) ud fra Keplers 3. lov, givet at man kan estimere stjernens masse.

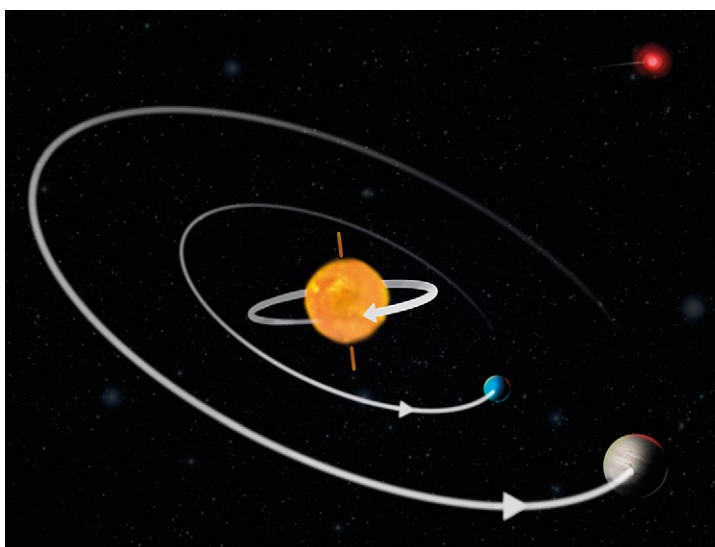
## Solsystemet er lidt skævt

I næsten 300 år har vi vidst, at Solsystemet blev dannet ved, at en stor sky af gas og støv kollapsede og begyndte at rotere om sig selv. I 1734 beskrev den svenske naturfilosof Emanuel Swedenborg, hvordan Solen og planeterne opstod af skyen, og senere i 1700-tallet blev modellen udbygget af den tyske filosof Immanuel Kant og særligt den franske matematiker Pierre-Simon Laplace.

Men Solsystemet er ikke så pænt og velordnet, som det burde være ifølge Laplaces beregninger. Det er ikke svært at forestille sig, at kollapset af skyen resulterede i en roterende sol omgivet af en skive af gas og støv, hvor planeterne blev dannet, og nu kredser rundt i cirkler i samme baneplan, som er vinkelret på Solens rotationsakse. Men sådan er det ikke helt. Solens rotationsakse er cirka syv grader fra at være vinkelret på Jordens baneplan, og de andre planeter kredser heller ikke rundt lige ud for Solens ækvator.

Det kræver en forklaring. Har voldsomme begivenheder i den protoplanetari-ske skive tidligt i Solsystemets historie skubbet det skævt, eller skyldes skævvridningen påvirkninger fra en anden stjerne eller måske en endnu ikke opdaget niende planet ude i Solsystemets fjerneste egne?

De fortsatte studier af andre planetsystemer i vores galakse kan gøre astronomerne klogere på, hvordan planetbaner kan skævvrides, og så kan de måske også finde ud af, hvad der sket i Solsystemet.



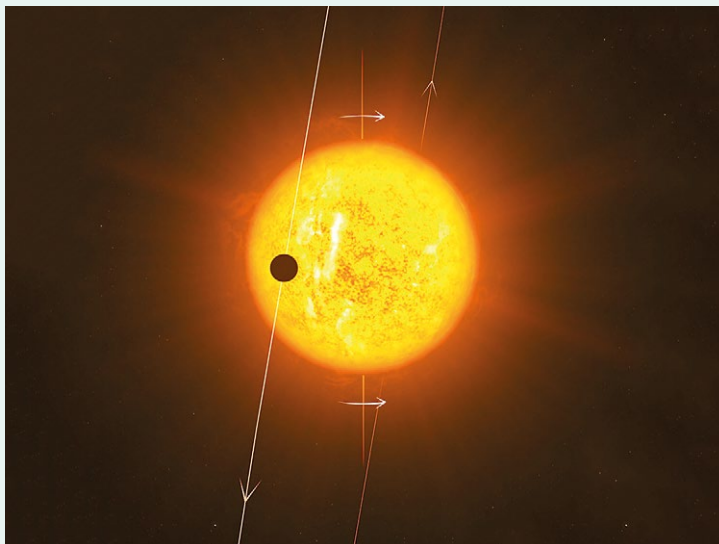
I systemet K2-290 kredser to planeter rundt i den modsatte retning af stjernens rotation. Det skyldes sandsynligvis påvirkningen fra nabostjernen i triplet-systemet.

Men der er andre parametre, der er noget sværere at bedømme, og som også hører med til historien om planetsystemerne. Det er sådan noget som banernes excentricitet, altså hvor langt de elliptiske baner er fra at være perfekte cirkler – jo højere excentricitet, desto mere aflange eller fladtrykte er banerne. Og Simon Albrecht vil også gerne vide mere om den måde, himmellegemernes rotationsakser hælder i forhold til hinanden og det baneplan, de kredser om hinanden

i. Banehældningen kan nemlig fortælle en hel del om, hvordan systemerne opstod, og hvordan de siden har udviklet sig.

Et godt eksempel er systemet K2-290, der blev opdaget ved hjælp af det amerikanske rumteleskop Kepler. I 2019 kunne et internationalt hold astronomer, heriblandt Simon Albrecht og hans to ph.d.-studerende Maria Hjorth og Anders Justesen, rapportere om fundet af to planeter i kredsløb om den største stjerne i

Illustration:  
ESO/B. Addison



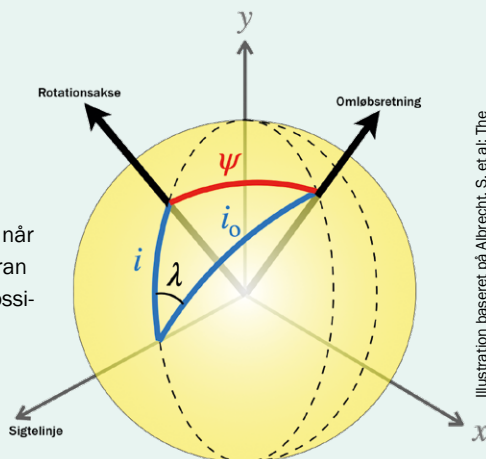
## Sære exoplaneter foretrækker polære baner

De fleste exoplaneter kredser pænt rundt om deres stjerne i samme plan som stjernens ækvator, men nogle af dem har mærkelige baner. De kan for eksempel kredse modsat deres stjerne eller vinkelret på stjernens rotation.

I et af de mange projekter, som Simon Albrechts gruppe var involveret i, undersøgte forskerne netop, hvordan planeter kredser rundt om deres stjerner i forhold til stjernens rotation. Det overraskende resultat var, at der blandt exoplaneter i uventede baner tilsyneladende er en forkærlighed for at kredse rundt i polære baner, altså omtrent vinkelret på stjernens ækvator. Blandt forfatterne til den videnskabelige artikel, der netop er offentliggjort i *Astrophysical Journal Letters*, finder man også Marcus L. Marcussen, som studerede astrofysik, mens han arbejdede på projektet. Han fik et 12-tal for sit speciale i emnet.

Retningen af en planets bane kan afsløres af radialhastigheden – rødforskydning eller blåforskydning – af lyset fra planetens moderstjerne, når planeten passerer ind foran stjernen (dette kaldes Rossiter-McLaughlin-effekten). Det er straks sværere at afgøre vinklen  $\psi$  mellem stjernens rotationsakse og kredsløbsakse. Med Rossiter-McLaughlin-effekten kan astronomerne måle den vinkel  $\lambda$ , der set her fra Jorden er mellem stjernens rotationsakse og kredsløbsaksen, men denne projicerede vinkel adskiller sig fra den virkelige vinkel  $\psi$ , som er den interessante. Her har astronomerne også brug for at estimere stjernens inklinationsvinkel  $i$  og kredsløbets inklination  $i_0$ . Sidstnævnte vil altid være tæt på 90 grader for en planet, der formørker sin stjerne, mens det kræver ekstra målinger af stjernens rotation at komme frem til en værdi for  $i$ .

Det lykkedes for 57 systemer, hvor 38 af planeterne kredsedes pænt rundt i nogenlunde samme plan som stjernens ækvator ( $\psi < 35^\circ$ ). Af de resterende systemer havde hele 18 vinkler mellem  $80^\circ$  og  $125^\circ$ , hvilket betyder, at planeten kredser rundt om stjernen i en næsten polær bane.



systemet, der består af tre stjerner.

De to planeter – en “mini-Nep-tun” med en radius på tre gange Jordens og en planet på størrelse med Jupiter – blev opdaget, fordi de undervejs i deres kredsløb kommer ind foran stjernen K2-290 A og formørker den en smule. Under stjerneformørkelserne registrerede Kepler en lille nedgang i lysstyrken fra stjernen.

Ved hjælp af følsomme spektrografer på jordbaserede teleskoper kunne forskerne bekræfte planeternes eksistens og estimere deres masse. Med spektrografer er det nemlig muligt at måle stjernens radialhastighed (hastighed imod os eller væk fra os), og så kan astronomerne følge stjernens “rokken” i sin bane om systemets fælles massemidtspunkt – en rokken forårsaget af tyngden fra planeterne.

Med det store teleskop Subaru og målinger fra det europæiske rumteleskop Gaia, der er i fuld gang med at kortlægge Mælkevejen ved at måle position og hastighed for mere end en milliard af Mælkevejens stjerner, kunne astronomerne konstatere, at K2-290 A er en del af et triple-system. Det tæller to røde dværgstjerner henholdsvis 113 og 2467 astronomiske enheder fra hovedstjernen, der er noget større end Solen (en astronomisk enhed er middelfstanden mellem Solen og Jorden).

Sådan et system er spændende nok i sig selv, men ved de opfølgende studier, som Maria Hjorth stod i spidsen for, var der for alvor bonus. I 2021 viste det sig nemlig, at planeterne kredser rundt modsat stjernens rotation.

»Her har vi to planeter, der kredser rundt i samme plan, men i den modsatte retning af deres stjernens rotation. Simuleringer viser, at det må skyldes påvirkninger fra den lille ledsagestjerne K2-290 B, der er cirka 113 astronomiske enheder fra hovedstjernen. Tidligt i systemets historie har ledsagestjernen drejet



den protoplanetariske skive om Kepler K2-290 A, så vinklen mellem stjernens ækvator og planeternes baneplan nu er cirka 124 grader,« fortæller Simon Albrecht og fortsætter:

»Det er første gang, vi med stor sikkerhed kan sige, at en ledsagestjerne har vippet den protoplanetariske skive. En så stor banehældning kan ikke skyldes turbulens eller protoplaneters påvirkning af hinanden i skiven.«

»Det kunne være sket i vores eget solsystem, hvis Solen havde haft en ledsagestjerne i den rette afstand. Så havde vi måske undret os over, at Solen drejede den forkerte vej, og vores teorier for dannelsen af Solsystemet havde været helt anderledes.«

### Tidevandskræfter påvirker planetbaner

Exoplaneterne kredser rundt ganske tæt på deres stjerne, så i dette tilfælde er de sandsynligvis dannet længere ude i den protoplanetariske skive og så vandret ind gennem skiven i en proces, hvor de har overført impulsmoment (et mål for bevægelsesmængden om omdrejningsaksen) til skivens gas og støv.

Men der findes også andre måder, som kan få exoplaneter til at komme tættere på stjernen, som man ser det med "hot Jupiters". Det kan være tidevandskræfter, der har været på spil.

»Tidevandskræfter kan gøre mange ting: De kan gøre en bane mere cirkelformet og altså mindre aflang, de kan rette banen ind, så den er vinkelret på stjernens rotation, og de kan føre til bunden rotation, hvor det ene himmellegeme hele tiden vender samme side mod det andet, som vi ser det med Månen, der altid vender samme side mod Jorden,« siger Simon Albrecht.

På grund af tidevandskræfter bevæger Månen sig stille og roligt længere og længere væk fra Jorden med en hastighed af 3,8 cm om året. Tide-

## Om forskeren

Simon Albrecht er lektor ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet. Her er han tilknyttet Stellar Astrophysics Centre, der er et såkaldt Center of Excellence – et grundforskningscenter, primært finansieret af Danmarks Grundforskningsfond. Centeret ledes af professor Jørgen Christensen-Dalsgaard.

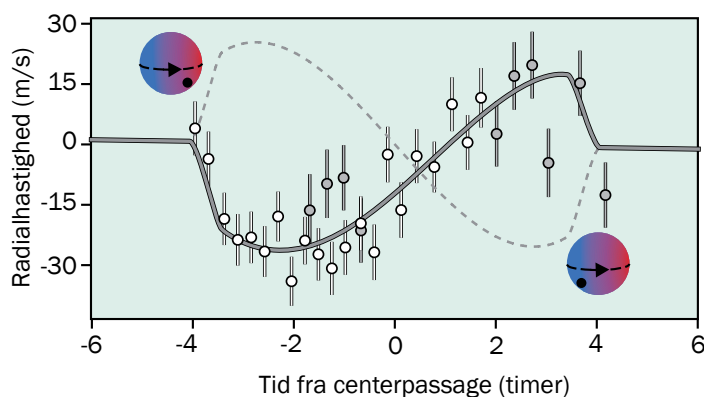
Simon Albrecht kommer fra Tyskland, hvor han har studeret fysik i Hamburg med astronomi og oceanografi som sidefag. Han fik sin master indenfor fasstoffysik, og drog herefter til Leiden i Holland, hvor han lavede sin ph.d., hvori han skiftede sit fokus til astrofysik. Herefter arbejdede han et par år som postdoc ved MIT i USA, før han kom til Aarhus Universitet i 2014.



Foto: AU

Sideløbende med sine studier har Simon Albrecht også uddannet sig til forskningsdykker og har også arbejdet som en sådan for et tysk forskningsinstitut. Privat er han gift og har to børn, der begge er født i Aarhus.

En del af forskningen beskrevet i artiklen er finansieret via en Sapere Aude-bevilling fra Danmarks Frie Forskningsfond, som gives til yngre forskere, der kan sikre dansk forskning i verdensklasse. De latinske ord sapere aude kan oversættes til "vov at vide".



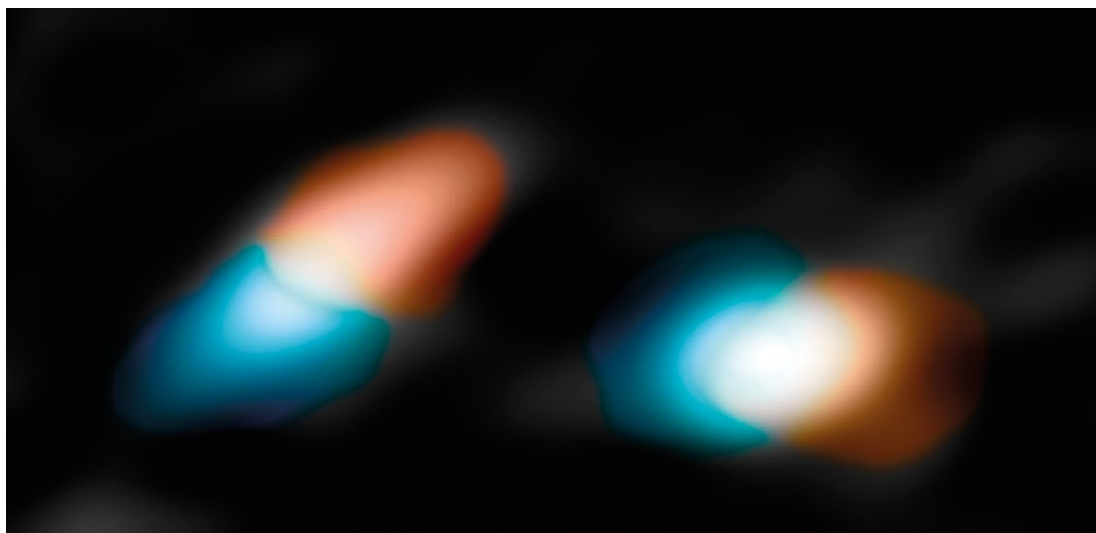
Figur tilpasset fra Hjorth, M., Albrecht, S. et al (2021).

Figuren viser spektrografiske data optaget med teleskoper placeret på henholdsvis La Palma og Hawaii (henholdsvis hvide og mørke cirkler), som begge viser den største exoplanet i systemet K2-290 passere ind foran sin moderstjerne.

Planetens bane er modsat stjernens omdrejningsretning, hvilket afsløres af, at man set fra Jorden observerer først en blåforskydning af lyset efterfulgt af rødforskydning, når planeten passerer ind foran stjernen. Det skyldes, at først blokeres det rødforskudte lys og dernæst det blåforskudte. Den fuldt optrukne kurve er bedste fit af data, mens den stiplede kurve viser, hvad man ville have observeret, hvis retningen på planetens bane og stjernens omdrejning var ens.



Med radioteleskopet ALMA har astronomerne fundet ganske unge dobbeltstjerner med protoplanetariske skiver, der ikke flugter med hinanden. Illustrationen viser hastighedsdata for systemet HK Tau optaget med ALMA, hvor røde områder repræsenterer materiale, der bevæger sig væk fra Jorden, mens blå indikerer materiale, der nærmer sig. Illustration: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (IPAC)



### Videre læsning

Læs mere om exoplanet-gruppens arbejde på Aarhus Universitet [www.phys.au.dk/exoplanets](http://www.phys.au.dk/exoplanets)

Hjorth, M., Albrecht, S. et al (2021): A backward-spinning star with two coplanar planets. PNAS Vol. 118 No. 8 e2017418118

vandskræfterne skaber en udbulning på Jorden, og da Jorden roterer hurtigere rundt om sig selv, end Månen bevæger sig rundt om Jorden, kommer bulen "foran" i forhold til Månen. Det fører til, at Jordens rotation bliver bremsset, mens Månen til gengæld fjerner sig en smule fra Jorden, så det samlede impulsmoment for systemet bevares.

Men for de Jupiter-lignende exoplaneter kan tidevandskræfterne i stedet trække planeten tættere på stjernen, idet planeten kredser hurtigere om stjernen, end stjernen roterer om sig selv. Så overføres impulsmoment fra planet til stjerne, og planeten rykker tættere på. Det kan være en del af forklaring på, at astronomerne finder ganske mange "hot Jupiters".

Men hvis tidevandskræfter skal spille en afgørende rolle for en planets bane, skal planeten komme ganske tæt på sin stjerne tidligt i systemets historie. Det kan den gøre, hvis den kredser rundt i en meget aflang bane (dvs. med høj excentricitet), og så er spørgsmålet, hvordan en stor planet skabt i en protoplanetarisk skive kan opnå sådan en bane.

### Gaia-teleskopet vil gøre os klogere

Igen er der brug for en ekstra spiller i form af en ledsagestjerne, som kan forstyrre planeters baner. Det

viser sig nemlig, at en skæv planetbane, som kan være resultatet af påvirkninger fra en ledsagestjerne, kan forvandles til en bane med høj excentricitet via en effekt kaldet Kozai-Lidov-mekanismen efter de to astronomer, der beskrev den i starten af 1960'erne.

Kozai-Lidov-mekanismen kan veksle en stor banehældning til en høj excentricitet, og så kan tidevandskræfter gøre arbejdet færdigt og føre til "hot Jupiters". Men det kræver dobbeltstjernesystemer, hvor den ene stjerne omkredses af planeter, og den anden stjerne kredser rundt i en "skæv" bane, der ikke er parallel med planeternes baneplan.

»Som led i Sapere Aude-projektet ville jeg måle, om dobbeltstjerner bane om hinanden er vinkelret på deres rotationsakser eller ej. Jeg ville teste, om forudsætningerne for sådan en påvirkning af planetbanerne generelt er til stede,« siger Simon Albrecht, som kastede sig over en flok dobbeltstjerner sammen den ph.d.-studerende Anders Justesen.

Et tidligere studie havde vist, at tætte dobbeltstjerner adskilt af mindre end 30 astronomiske enheder typisk kredser rundt om hinanden i samme plan som stjernernes ækvator, mens det ikke er tilfældet for dobbeltstjerner

længere fra hinanden. Men det resultat kunne Simon Albrecht og Anders Justesen ikke genfinde. Til gengæld kunne de konkludere, at de nuværende data fra observationer simpelthen ikke er gode nok til at kunne konkludere noget endegyldigt om dobbeltstjerner baneplan i forhold til deres rotationer.

»Vi kom frem til, at konklusionerne fra det tidligere studie ikke holder, og nu ved vi, hvad der skal til for at få mere overbevisende resultater. Vi skal bruge de nye, præcise data om dobbeltstjerner, som rumteleskopet Gaia måler, og som bliver frigivet i løbet af 2022,« siger Simon Albrecht.

Generelt sukker astrofysikerne fra Aarhus Universitet efter nøjagtigt det samme som alle andre astrofysikere verden over: Flere data. De kommer heldigvis, ikke kun fra Gaia, men også fra andre teleskoper som rumteleskopet TESS, som er i fuld gang med at lede efter exoplaneter.

I de kommende år bliver vi en del klogere på, hvorfor nogle exoplaneter ender i mærkelige baner, mens andre kredser rundt om deres stjerne i meget pænere og mere velordnede baner, end vi ser det i Solsystemet. Men den fulde sandhed får vi nok aldrig, for universet bliver ved med at overraske. ■

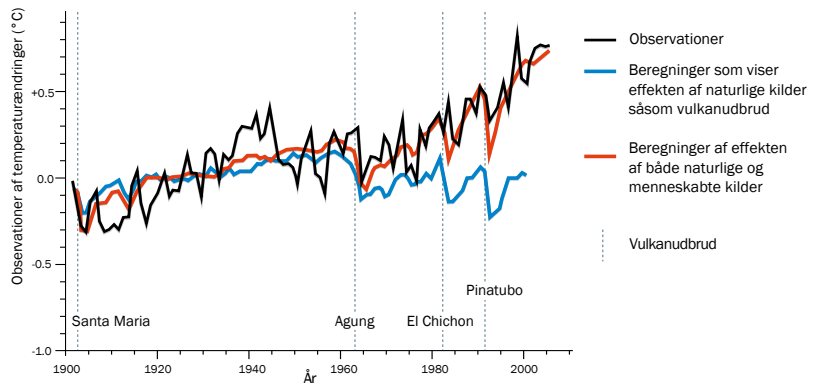


# Styr på det komplekse

**T**ilfældigheder og uorden karakteriserer komplekse systemer, hvilket gør dem svære at forstå. Derfor kan det være en Nobelpris værd at beskrive komplekse systemer og forudsige deres opførsel på den lange bane. Nobelprisen i Fysik i 2021 er således gået til tre forskere for deres bidrag til at kaste lys over komplekse systemer.

Den ene halvdel af prisen er gået til italieneren Giorgio Parisi, der omkring 1980 opdagede skjulte mønstre i uordnede, komplekse materialer. Hans opdagelser er blandt de vigtigste bidrag til teorien om komplekse systemer. Opdagelserne gør det muligt at forstå og beskrive mange tilsyneladende vidt forskellige materialer og fænomener, ikke bare indenfor fysikken, men også indenfor matematik, biologi, neurovidenskab og maskinlæring.

Den anden halvdel af Nobelprisen er gået til japaneren Syukuro Manabe og tyskeren Klaus Hasselmann, som hver især har ydet vigtige bidrag til vores forståelse af klimaet, som er et skoleeksempel på et komplekst system med allerstørste betydning for os mennesker. Syukuro Manabes har bidraget ved



Kilde: Hegerl & Zwiers (2011): Use of models to detect and attribute climate change. WIPAC Climate Change. Grafik: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.

Klaus Hasselmann udviklede metoder til at skelne mellem fingeraftrykket fra henholdsvis naturlige og menneskeskabte årsager bag opvarmning af atmosfæren. Figuren viser en sammenligning mellem ændringer i forhold til gennemsnitstemperaturen for perioden 1901-1950.

at demonstrere, hvordan et forøget niveau af CO<sub>2</sub> i atmosfæren leder til forøget temperatur ved jordoverfladen. I 1960'erne ledede han udviklingen af fysiske modeller af Jordens klima og var den første til at undersøge vekselvirkningen mellem strålingsbalancen og den vertikale transport af luftmasser. Hans arbejde lagde grunden til udviklingen af de klimamodeller, man bruger i dag.

Omkring 10 år senere skabte Klaus Hasselmann modeller, som sammenkædede vej

og klima, hvorved han gav et svar på, hvorfor klimamodeller kan være troværdige på trods af, at vejret er foranderligt og kaotisk. Han udviklede også modeller til at identificere specifikke signaler, fingeraftryk, som både naturlige og menneskeskabte påvirkninger sætter på klimaet. Hans metoder er blevet brugt til at vise, at de øgede temperaturer i atmosfæren kan tilskrives menneskeskabt udledning af CO<sub>2</sub>.

CRK, Kilde: Nobel.se



[sdu.dk/ing](https://www.sdu.dk/ing) #sduing

## SKAL DINE ELEVER PRØVE AT VÆRE INGENIØRSTUDERENDE FOR EN DAG?

Din elev følger en af vores ingeniørstuderende gennem en hel dag, deltager i undervisningen og i projektarbejdet. Eleven får en rundvisning på Det Tekniske Fakultet, ser laboratorier og vores andre spændende, innovative faciliteter. Dagen giver et indblik i at studere på ingeniøruddannelserne, og eleven får mulighed for at spørge vores studerende om alt fra det faglige til det sociale.

Målet er at give dine elever forudsætningerne for at tage et kvalificeret studievalg. Vores studievejleder står ligeledes til rådighed på dagen.

Eleven laver selv besøgsaftalen. Studerende for en dag afholdes i februar-maj og september-december.

Mere information og tilmelding:  
[www.sdu.dk/tek/studerendeforendag](https://www.sdu.dk/tek/studerendeforendag)

Find vores forskellige ingeniøruddannelser på:  
[www.sdu.dk/ing](https://www.sdu.dk/ing)

Kontakt:  
Tlf. 6550 7444 eller [brobygning@tek.sdu.dk](mailto:brobygning@tek.sdu.dk)

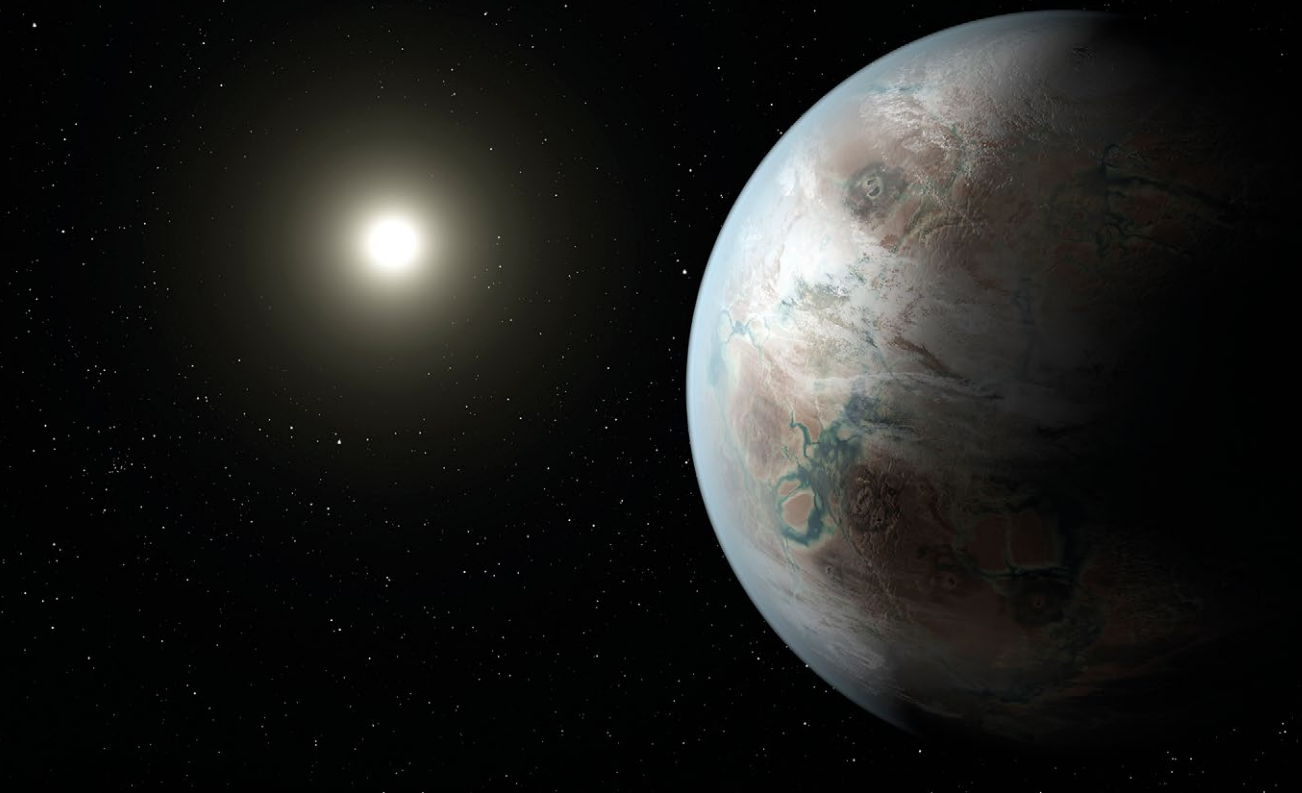


Lone Simonsen, professor i folkesundhedsvidenskab ved Roskilde Universitet

”  
Med matematiske  
og statistiske modeller  
undersøger vi historiske  
og nutidige pandemier  
for at forstå fremtidens  
trusler.”

Bliv cand.scient. i Mathematical Bioscience på Roskilde Universitet  
Læs om uddannelsen på [ruc.dk](http://ruc.dk)





Kunstnerisk indtryk af exoplaneten Kepler-452b, som er en jordlignende planet, der kredser om en ligeledes meget sølignende stjerne godt 1400 lysår fra Jorden. Et af de helt store spørgsmål er, om der findes liv på nogle af de mange jordlignende planeter i Universet, og hvis der gør, ligner det så livet på Jorden?  
Illustration: NASA Ames/JPL-Caltech/T. Pyle

Om forfatterne



Kai Finster er kandidat i biologi fra Aarhus Universitet og har en ph.d.-grad i mikrobiel økologi. Siden 1999 har han været ansat som lektor ved sektion for mikrobiologi, Aarhus Universitet og i 2019 blev ansat samme sted som professor i astrobiologi. Han har især beskæftiget sig med muligheden for at finde liv på Mars.  
kai.finster@bio.au.dk



Niels Iver Winstrup Nielsen er kandidat fra Aarhus universitet fra 1981 med teoretisk atomfysik som speciale. Siden 1983 har han arbejdet som gymnasie-lærer, og han er i dag han ansat på Risskov Gymnasium, hvor han underviser i fysik og i kemi. Han interesserer sig især for systemer i ikke-ligevægt.  
nielsiver@gmail.com

# LIV BASERET PÅ SILICIUM I STEDET FOR KULSTOF

– en død **sild**

**Grundstoffet silicium ligner kulstof på flere måder,  
og det har fået forskere til at spekulere over, om liv på fjerne planeter  
kunne være baseret på silicium i stedet for kulstof som her på Jorden.**

**Hvorfor det i praksis ikke kan lade sig gøre,  
får vi forklaringen på her.**

Vores søgen efter liv udenfor Jorden har nået nye højder. Rumbaserede teleskoper som Hubble, Kepler og TESS gør det muligt at finde planeter om andre stjerner og nyeste estimater anslår, at mange af disse planeter er jordlignende og kredser om sølignende stjerner.

Dermed ligger det implicit i kortene, at der er en ret stor sandsynlighed for, at der findes liv udenfor for Jorden. Det er derfor nærliggende at spørge: Hvordan kan vi finde ud af, om der er liv på disse planeter, og om det ligner jordisk liv?

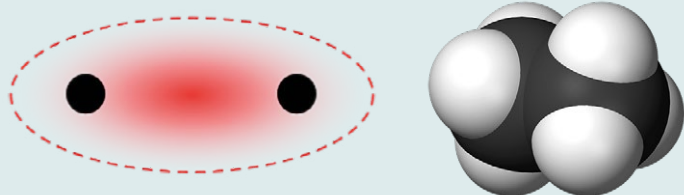
Når forskerne leder efter liv i rummet, er det i sagens natur liv, der minder om jordisk liv, da det jo er den eneste slags liv, vi kender. Det er altså liv, som i hovedsagen er opbygget af kulstofatomer, som vi kender det fra for eksempel DNA, proteiner, fedtstof og kulhydrater. I vores egen krop er det kun knogler og tænder, som ikke består af kulstof. Det store spørgsmål er, om det også gælder det liv, man måske kan finde i rummet. Kunne man forestille sig liv baseret på andre grundstoffer end kulstof? Det grundstof, som oftest nævnes som en mulighed, er silicium, da det er

det grundstof, der har flest træk tilfælles med kulstof. I denne artikel vil vi se på, om liv i lighed med det, vi finder på Jorden, men baseret på silicium i stedet for kulstof, nu også er en realistisk mulighed.

## Ligheder og forskelle mellem kulstof og silicium

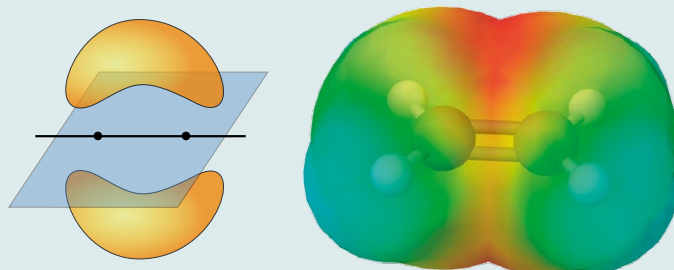
Kulstof har mange fremragende egenskaber som "livets byggesten". Kulstofatomer kan danne et hav af kæder, forgrenede kæder og ringe, som vi kender fra for eksempel fedtstoffer og kulhydrater. Molekylerne er forholdsvis stabile uden at være "for" stabile. Det vil sige, at det kræ-

## Sigma- og Pi - bindinger



Figuren til venstre illustrerer en binding imellem to atomer, anført med sort. Den røde elektronsky indeholder de to elektroner, der danner bindingen. Bindingen er symmetrisk ved en rotation omkring en akse, der forbinder de to atomer, og kaldes derfor en sigma-binding ( $\sigma$ -binding).

Figuren til højre viser elektronskyerne i ethan-molekylet ( $C_2H_6$ ), hvor der kun findes  $\sigma$ -bindinger



Figuren til venstre illustrerer en binding imellem to atomer, anført med sort. De gule elektronskyer indeholder tilsammen de to elektroner, der danner bindingen. Bindingen er spejlsymmetrisk og kaldes en pi-binding. Læg mærke til, at de bindende elektroner i  $\pi$ -bindingen ligger længere væk fra atomkernerne, end det er tilfældet ved  $\sigma$ -bindingen.

Figuren til højre viser elektronskyerne i molekylet ethen ( $C_2H_4$ ), hvor de to kulstofatomer er bundet sammen med henholdsvis en  $\sigma$ - og en  $\pi$ -binding.

ver en "passende" energimængde at bryde bindingerne. Hvis bindingsenergien var meget mindre, ville de kemiske forbindelser for eksempel let kunne selvantænde, mens for stor en bindingsenergi ville betyde, at de kemiske forbindelser ikke ville kunne reagere.

Et oplagt alternativ til kulstof kunne være silicium, der står lige under kulstof i det periodiske system. Begge atomer har fire elektroner i den yderste skal og kan derfor danne fire bindinger med andre atomer. De kan begge danne kæder og ringe, men selv om dette er nødvendigt, er det ikke tilstrækkeligt for at kunne danne mere komplicerede biologiske molekyler. Hvorfor?

Den afgørende forskel på kulstof og silicium ligger i, at hvor de 4 elektro-

ner i kulstof befinder sig i atomets 2. skal, befinder de sig for siliciums vedkommende i 3. skal. Silicium har således en radius på 210 pm (picometer), mens kulstof har en radius på 170 pm (en picometer er en milliardte del af en millimeter). Forskellen i størrelse har afgørende betydning for styrken af de bindinger og bindingstyper, silicium kan indgå i.

### Liv og dobbeltbindinger

Kulstof kan danne en dobbeltbinding til andre kulstofatomer og til for eksempel nitrogen- og oxygenatomer. En dobbeltbinding består af to bindingstyper, der traditionelt kaldes for henholdsvis en sigma-binding og en pi-binding (ofte blot angivet med det græske bogstav for henholdsvis sigma og pi, det vil sige  $\sigma$ -binding og  $\pi$ -binding). I sigma-bindingen befinder de to

elektroner sig i en sky symmetrisk omkring en akse imellem de to atomer. I pi-bindingen danner de to elektroner en sky, der ligger noget længere væk og som minder lidt om burgerbolle.

Her er så en afgørende forskel: Silicium kan kun danne sigma-bindinger og ikke pi-bindingen, og derfor kan silicium ikke danne dobbeltbindinger. Dette skyldes, at afstanden imellem de elektroner, der skal danne pi-bindingen, simpelthen er for stor, da bindingen skal dannes af elektroner fra 3. skal.

En dobbeltbinding resulterer i en "fastlåsnings" af molekylet omkring dobbeltbindingen, og flere dobbeltbindinger i et molekyle er derfor med til at give det en bestemt geometrisk form, hvilket har biologisk betydning. Det betyder, at mere komplicerede biologiske molekyler med dobbeltbindinger, som spiller en væsentlig rolle i organismernes stofskifte, ikke kan dannes med siliciumatomer.

Så selvom silicium kan danne kæder og ringe, er disse for simple til at skabe biologisk aktive molekyler. Kulstofs bindinger til nitrogen og ilt er vigtige ved dannelse af aminosyrene, som er byggestenen i proteiner. Her kan et enkelt kulstofatom erstattes med silicium, men resten skal stadig være kulstof, specielt kan kulstof i den del af molekylet, der karakteriserer en aminosyre, ikke erstattes.

### Fri ilt og siliciumbaseret liv er en krudttønde

Da elektronerne i den yderste skal i siliciumatomet er en lille smule længere væk fra atomkernen, end det er tilfældet for kulstof, har disse elektroner lettere ved at deltage i kemiske reaktioner. Det har stor betydning for stabiliteten af siliciumforbindelser i en atmosfære, der indeholder cirka 20 % ilt, som det er tilfældet på Jorden i dag. Hvis vi sammenligner de to mest simple kulstof- og siliciumforbindelser – metan ( $CH_4$ ) og silan ( $SiH_4$ ) – så er metan stabil ved stuetemperatur,



og der skal tilføres energi i form af for eksempel en gnist for at antænde metanen. Derimod antændes silan spontant ved stuetemperatur i en atmosfære som på Jorden. Det gælder for alle silaner op til en kædelængde på 7 siliciumatomer. Med andre ord: I en verden, der indeholder fri ilt, vil silicium-baseret liv leve i en krudttønde.

### Kuldioxid eller sand – det er spørgsmålet

Som bekendt er kuldioxid (CO<sub>2</sub>) udgangs- og endepunkt for livets processer. Bakterier eller planter opsamler kuldioxid (CO<sub>2</sub>) fra atmosfæren, og i en kompleks biokemisk proces, som oftest involverer sollys og vand, omdannes dette til kulhydrater, som er udgangsmateriale for alle de andre kulstofmolekyler, der findes i en organisme.



I organismernes metabolisme bliver kulhydraterne forbrændt, og kuldioxid og vand frigjort.



Samtidig frigives energi, som kan bruges til at danne nye kulstofmolekyler eller til at udføre et arbejde. CO<sub>2</sub> og vand kan genbruges i en ny omgang fotosyntese.

Hvordan vil det se ud ved silicium-baseret liv? I stedet for at optage og afgive CO<sub>2</sub> skulle organismen optage og afgive siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>), som vi også kalder kvarts, og som ofte udgør hovedparten af sand. Her er “problemet”, at kvarts er et fast stof med en meget stabil struktur, som derfor er meget svært at omdanne. Dette afspejler sig for eksempel i, at det først koger ved en temperatur på 2230 °C.

### Silicium dur ikke som kulstofstatning i liv

De egenskaber ved silicium, vi har beskrevet her: manglende evne til at kunne danne dobbeltbindinger, at simple siliciumforbindelser selvantænder ved stuetemperatur samt et mineral som udgangs- og slutprodukt i metabolismen, gør det umuligt at forestille sig et silicium-baseret liv som et alternativ til kulstofbaseret liv. Skulle man finde tegn på liv på andre planeter, kan dette derfor ikke være baseret på silicium. ■

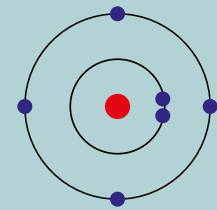
## Kulstof

5mm  
1/4"



Rob Lavinsky,  
iRocks.com  
CC-BY-SA-3.0

Kulstof i form af diamant og grafit.

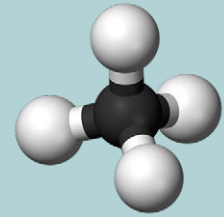


Kulstof (C)

Elektronernes fordeling over skallerne i kulstof

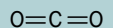
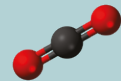
Kulstof (eller carbon) er grundstof nr. 6 i det periodiske system, og findes i ren form i grafit (blyantstifter), diamanter og som hovedbestanddel i kul.

Kulstof er det 3. mest hyppige grundstof i Universet. Det dannes i stjerners indre ved fusion af lettere grundstoffer og spredes i Universet, når stjernen ender sine dage i en kæmpeeksplosion (en supernova). Herefter kan kulstof indgå som materiale ved dannelse af planeter.



Methan (CH<sub>4</sub>)

Kulstofs 4 uparrede elektroner i yderste skal betyder, at det kan danne 4 bindinger med andre grundstoffer. Det kan symboliseres ved, at der fra et kulstofatom altid skal udgå 4 “pinde”. I methan (CH<sub>4</sub>) dannes der bindinger til 4 hydrogen-atomer, og i kuldioxid (CO<sub>2</sub>) dannes der to dobbeltbindinger til to oxygenatomer.

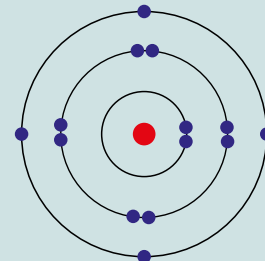


Kuldioxid (CO<sub>2</sub>)

## Silicium



Silicium, CC-BY-SA-3.0.



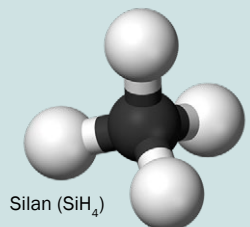
Silicium (Si)

Illustration af elektronernes fordeling over skallerne i Silicium.

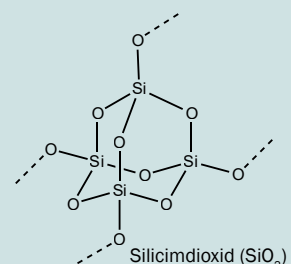
Silicium er grundstof nr. 14 i det Periodiske system. I modsætning til kulstof findes det yderst sjældent som rent silicium i naturen, da det hurtigt reagerer med ilt og danner mineralet kvarts (SiO<sub>2</sub>).

Silicium er det 8. mest hyppige grundstof i Universet, men i jordskorpen overgås det i hyppighed kun af ilt. Siliciums 4 uparrede elektroner i yderste skal betyder, at det kan danne 4 bindinger med andre grundstoffer.

I silan (SiH<sub>4</sub>) dannes der bindinger til 4 hydrogen-atomer, og det ligner i struktur methan. Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>) er ikke en gas som kuldioxid, som består af små molekyler, men er et krystaldannende faststof.



Silan (SiH<sub>4</sub>)



Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>)

# TORNADOER

## – lokale, voldsomme og uforudsigelige

Billede af en tragtsky/tornado med kontakt til havoverfladen forbundet til en roterende byggesky. Taget over Østersøen om aftenen den 15. august 2021. Man for- nemmer næsten bygens rotation, når man kigger på billedet.

Foto: Mathiass Lohr.

**Tornadoer er et fænomen, de færreste danskere har oplevet på nært hold. Men tornadoer optræder hvert år i vores naboland Tyskland, og også i Danmark har vi de senere år oplevet vejrfænomener, der passer på en tornado. At varsle en sådan begivenhed på forhånd, er dog lettere sagt end gjort.**

### Forfatteren



Jesper Eriksen er uddannet meteorolog fra Københavns Universitet og DMI og arbejder til daglig som meteorolog på DMI. Denne artikel er dog skrevet i privat regi, og forfatteren kan derfor kontaktes på [jespereriksen2@hotmail.com](mailto:jespereriksen2@hotmail.com)

**T**ornadoer er jordklodens voldsomste vejrfænomener. Tornadoer rammer ultra-lokalt, har en kort levetid, og har derfor meget let ved et lege gemmeleg med det officielle meteorologiske måleudstyr. Derfor er der endnu meget, man ikke ved om tornadoer.

Vi kender specielt tornadoer fra den midtvestlige del af USA i et område der betegnes som Tornado-Alley. Men de optræder også i Europa, hvilket tjekkerne oplevede et dramatisk eksempel på i juni måned her i 2021. Også her i Danmark kan tornadoer opstå, om end det er en meget sjælden begivenhed. Men vi har antageligt haft flere episoder

med danske tornadoer i de senere år, og i år var ingen undtagelse. Dette giver en god anledning til at se nærmere på dette fascinerende naturfænomen.

### Hvad er en tornado?

Tornadoer dannes i et komplekst samspil mellem et uvejrs interne dynamik og luftmiljøet uden for uvejret. Meget kort fortalt skal der være masser af varme og fugtighed til stede, og atmosfæren skal være i en tilstand, hvor vindens retning og hastighed ændrer sig markant som en funktion af højden, det man på fagsprog kalder for et wind-shear. Der er dog fortsat ikke faglig enighed om, hvordan tornadoer helt præcist opstår.

Derudover kan definitionen på en tornado faktisk også være lidt forskellig, afhængig af hvilken meteorologisk organisation, man spørger. Ifølge The National Weather Service – der er USA's svar på DMI – defineres en tornado som "en voldsomt roterende søjle af luft, der berører jordoverfladen, og som normalt er forbundet til skybasen af en uvejrs-sky med torden."

Det fremgår altså, at den kraftige rotation skal have kontakt til jordoverfladen, førend der er tale om en tornado. I den amerikanske definition nævnes også, at tornadoer oftest, men ikke altid, har forbindelse til skybasen fra et "uvejr" med torden.

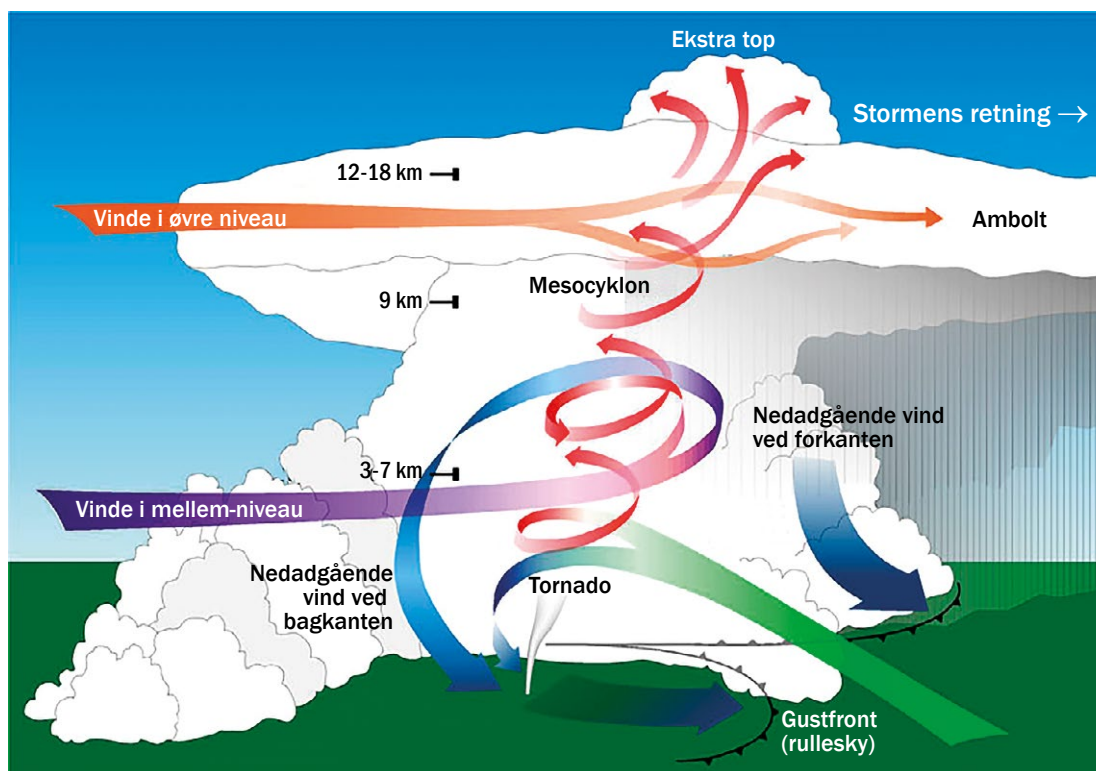


Illustration af en klassisk supercelle (der findes nemlig forskellige typer). I midten ses mesocyklonen, der er den roterende delmængde af den forvoksede superbyge. I denne figur er supercellen ledsaget af en tornado, som kommer under mesocyklonen. Til forskel fra en typisk dansk skypumpe, der gerne kommer i ydersiden af en bygesky, udspringer tornadoen fra bygens/supercellens "hjerter". Illustration: NOAA/National Severe Storms Laboratory.

I USA bruger man den såkaldte EF-skala, som går fra 0-5, til at klassificere tornadoers styrke, hvor 5 er kraftigst. En EF-5 tornado vurderes til at have vind på over 322 km/timen (89 m/s). Der er ingen, der har målt direkte på vinden i en tornado, men den 3. maj 1999 blev en tornados vindstyrke estimeret ud fra radardata til at have en vindstyrke på op til 512 km/t (142 m/s). Det er mere end 4 gange orkanstyrke. Til sammenligning er det kraftigste vindstød målt i Danmark på 53,5 m/s i forbindelse med orkanen Allan den 28. oktober 2013.

Tornadoer har en relativt kort levetid, der dog kan variere fra få sekunder til flere timer. I USA opgives den typiske levetid til at være 5 til 10 minutter. Derudover er tornadoer ret små i deres geografiske udbredelse i forhold til andre vejrfænomener. Her er der dog også stor variation, og den enkelte tornado kan faktisk ændre størrelse i løbet af sin levetid. Rekord for den bredeste dokumenterede tornado er på hele 4184 m. Normalt har en tornado dog kun en diameter mellem 100 og 600 meter. Her skal det nævnes, at det kun er den del af tornadoen, som er blevet til en roterende sky, man kan se med det blotte øje, med mindre tornadoen har hvirvlet materiale op, der snurrer rundt i cirkelbevægelser. Der er også forskel på, hvor ofte tornadoer forekommer rundt omkring i verden, og

Styrke	Vindhastighed (km/t)	Skade	
<b>EF5</b>	>322	Total	
<b>EF4</b>	267-322	Katastrofal	
<b>EF3</b>	219-266	Alvorlig	
<b>EF2</b>	179-218	Betydelig	
<b>EF1</b>	138-178	Moderat	
<b>EF0</b>	105-137	Lille	

The Enhanced Fujita Scale anvendes i USA til at kategorisere tornadoers styrke. Kilde: Federal Emergency Management Agency (Fema) / Wikipedia.





En skypumpe danser over Limfjorden ud for Løgstør. Skypumpen befinder sig yderområdet af en bygsky. Billedet er taget af journalist Lasse Damsgaard, Nordjyske Medier, om eftermiddagen lørdag den 7. august.

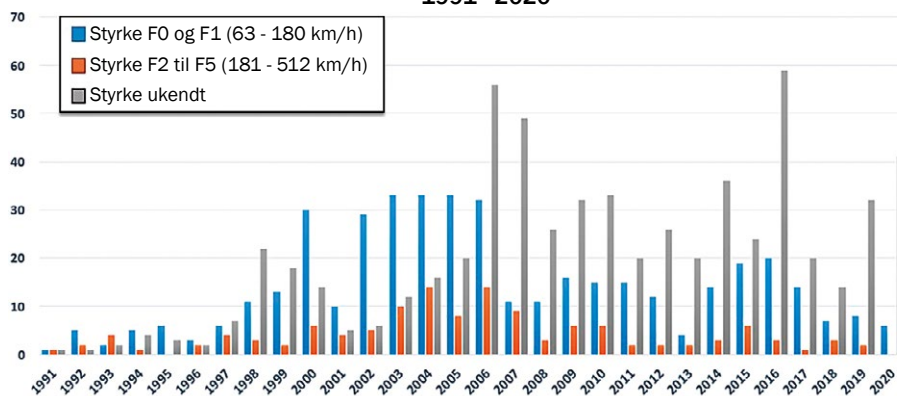
har været i stand til at måle direkte på en skypumpe, eller analysere dens dannelse og uddøen. Så vi ved i princippet ikke, hvor kraftige vindene er inde i og omkring en skypumpe, eller hvordan den egentlig dannes. Selvfølgelig findes der teorier for dannelsen af skypumper, men dem vil jeg dog ikke komme nærmere ind på. Jeg kan dog nævne, at skypumper faktisk kan forekomme fra skyer, uden at der er nedbør, og er de forbundet til en bygsky, er de gerne at finde i byens yderområde væk fra den del af bygskysten, hvor selve nedbøren falder fra.

Populært sagt kan man kalde en skypumpe for en lillebror til tornadoerne, både hvad størrelsen og vindhastighederne angår. Hvis man accepterer skypumper som en spæd lillebror i tornadofamilien, vil de antageligt være EF-0'ere, eller med endnu mindre vindhastigheder end de 105-137 km/timen (29-38 m/s), altså vinde af storm- til orkanstyrke, som en EF-0 opgives til. Og deres størrelse vil nok også være mindre, eller i den lave ende af den typiske tornadodiameter på 100-600 m. En skypumpe kan dog godt være farlig og kaste med havetrampoliner, hvilket vi så et eksempel på i Ølstykke i maj måned i år.

### Superceller og tornadoer

Tornadoer opstår typisk, men ikke altid, i forbindelse med særligt kraftige uvejr, såkaldte superceller. En supercelle er forsimplet sagt et eksplosivt voksende uvejr, der har sin helt egen rotation. Denne roterende delmængde af selve supercellen findes i "hertet" af cellen og kaldes for en mesocyclon (et lille lavtryk). Bygernes benzin er varme og fugtighed – og det er der masser af i Tornado Alley i det midtvestlige USA i de perioder, hvor en sydlig strømning har pumpet meget fugtig luft op fra den Mexicanske Golf. Derudover opstår der store temperaturkontraster, når kulden fra Canada forsøger at dykke ned over USA. Alt dette er med til at skabe grobund for voldsomme uvejr, når de rette vejr-situationer opstår. Langt de fleste tornadoer kommer i forbindelse med superceller, men

Antal tornadoer pr. år 1991 - 2020



Statistik over indrapporterede tornadoer i Tyskland i perioden fra 1991-2020. Statistikken stammer fra European Severe Weather database (ESWD), og der skelnes ikke direkte mellem tornadoer og skypumper. Men det må antages, at styrker over F2 har været tornadoer. De grå søjler vidner også om, at der er mange tornadoer/skypumper, hvor styrken ikke er blevet estimeret.

Deutsche Wetterdienst (DWD) optræder som officiel partner til ESWD og opnår herved et tæt samarbejde med lokale tyskere, der ligesom i USA indrapporterer, hver gang en tornado observeres. Her i internettets tidsalder er det meget let at indrapportere og modtage en tornadoobservation. I starten af 1990'erne var det mere besværligt, og det er ikke usandsynligt, at det er baggrunden for det lave antal tornadoer i starten og midten af 1990'erne. Men man kan heller ikke afvise, at der bare ikke var så mange tornadoer i den periode.

mange steder er de meteorologiske betingelser for dannelse af tornadoer slet ikke til stede.

### Skypumper – tornadoens lillebror

I Danmark skelnes der normalt mellem skypumper og tornadoer, og de anses som to meget forskellige vejrfænomener. Men i princippet opfylder de begge den amerikanske tornado-definition (i USA bruger man også betegnelsen land/water-spout for mindre voldsomme

tornadoer, som på dansk ville blive kaldt en skypumpe).

Ordet skypumpe bruges hvert eneste år i den danske vejrjargon. De forekommer undertiden på dage med spredte byger og generelt rolige vindforhold, altså vejr-situationer der absolut intet har med uvejr at gøre. Men skypumper kan også forekomme på dage med tordenvejr over Danmark, men igen på dage, hvor det generelt ikke er særligt blæsende. Der er aldrig nogen, der



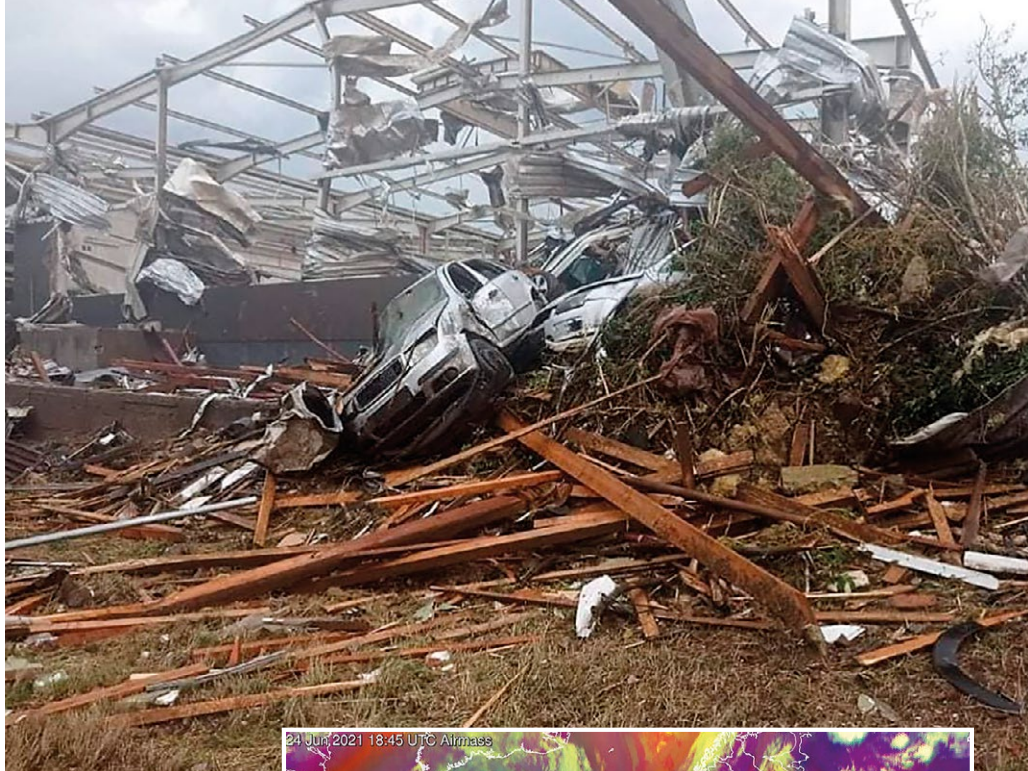
det er kun lidt under 1/3 af supercellerne i USA, der danner tornadoer.

Vender vi blikket mod mere hjemlige himmelstrøg, viser et overslag hentet fra en tornadostatistik fra Tyskland i perioden 1991 til 2020, at der stort set forekommer supercelle-tornadoer hvert år i Tyskland, dog ikke særligt mange. Som et groft overslag er det antaget, at alle tornadoer af styrken F2 og opefter er supercelle-tornadoer. Statistikken, som er hentet fra European Severe Weather Database (ESWD), skelner nemlig ikke mellem skyumper og tornadoer. Det skal også nævnes, at den skala, ESWD rangerer tornadoernes styrke på, ikke er den samme som i USA.

### Tornadoen på Møn?

I Danmark er der det meste af tiden simpelthen ikke nok varme og fugtighed til, at vi kan få supercelle-vejr. Og der findes så vidt jeg ved ikke en officiel, fyldestgørende og kvalitetskontrolleret tornadostatistik for Danmark tilsvarende den tyske. Med kvalitetskontrolleret mener jeg, at statistikken er anerkendt, gennemtjekket og godkendt af DMI. Dog kan folk fra alle lande i Europa i princippet indrapportere tornadoer og skyumper til ESWD, der drives af European Severe Storm Laboratory (ESSL). Og her er Deutsche Wetterdienst (Tysklands svar på DMI) opgivet som partner, i øvrigt sammen med 9 andre europæiske landes meteorologiske institutter.

Den 15. august i år indløb der om aftenen en rapport til ESWD om en tornadohændelse i Østersøen. Senere denne dag kort før midnat, altså efter det var blevet mørkt, blev Møn ramt af en voldsom vindhændelse, der medførte ødelæggelser. Det blev indrapporteret til ESWD som en mulig tornado, men der var ifølge denne rapport ingen, der så en tragsky på Møn. Det kan dog skyldes, at uvejret ramte efter mørkets frembrud. Alligevel fandt en video af en tornado fra denne sene aften lidt senere frem til medierne. Videoen var imidlertid optaget i Lolland flere kilometer fra Møn af en



Et billede af de voldsomme ødelæggelser fra en tornado, der ramte Tjekkiert om eftermiddagen den 24. juni 2021. Foto: Stormchasing DE

Et satellitbillede fra kl. 18:45 UTC den 24. juni 2021. De hvide og spredte plamager over Central- Og Østeuropa er kraftige tordenbyger. Et satellitbillede alene kan dog ikke afgøre, om der er tale om superceller – her skal man undersøge, om der er en selvstændig rotation/en mesocyklon i tordenbygen, og til dette bruger man radardata.

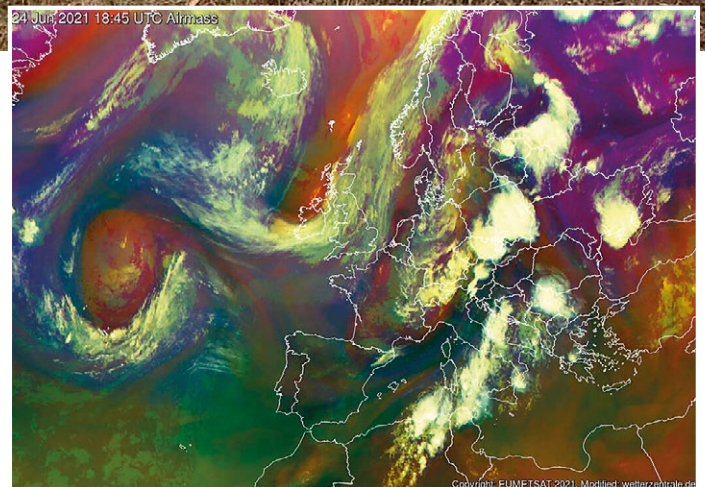


Illustration: EUMETSAT/wetterzentrale.de

lokal beboer i Maribo, og tornadoen blev afsløret i nattemørket, når lyn oplyste himlen.

Ifølge rapporten fra ESWD var der store skader på huse og træer på Møn i et spor, der var mindst 3 km langt og op til 150 m bredt. Størrelsen på dette skadespor passer som fod i huse med, at en tornado har været forbi. Kilden til disse skadesberetninger opgives til at være diverse medier og melding på sociale platforme, såsom Instagram og Facebook. Byerne bevægede sig i øvrigt ret hurtigt den aften, antageligt med cirka 80-90 km/timen, så tornadoen har antageligvis kun haft kontakt til jordoverfladen i kort tid. Man kan ikke afvise, at der har været tale om mere end én tornado i området. Det er nok sandsynligt, at det var to forskellige tornadoer, der ramte henholdsvis Lolland og Møn.

Nede ved overfladen var det ikke specielt blæsende denne aften. Møn ligger i Vordingborg Kommune, og her blev det kraftigste vindstød i de sene aftentimer af DMI's udstyr målt til beskedne 9,5 m/s, altså en frisk vind. Her er det igen vigtigt at pointere, at både skyumper og tornadoer er så lokale, at de leger gemmeleg med de officielle målinger. Data fra vejrballerne afslører i øvrigt, at der var et ret kraftigt vindshear i området den 15. august, altså en stor ændring af vindens styrke og retning med højden. Dette er en af betingelserne, for, at en byge kan få sin helt egen rotation og danne en mesocyklon.

### Døden i Tjekkiert

Sammenlignet med Danmark har Tyskland langt større potentiale for superceller end Danmark, så en dansk udgave af en tornadostatistik som den tyske, vil nok have meget





To biler blev væltet rundt af en tornado på en parkeringsplads ud for Aabenraa Sygehus den 14. juni 2019. Det hele gik så hurtigt, sikkert af få sekunders varighed, at ingen på sygehuset havde nået at få frit udsyn til, hvad der skete ude på parkeringspladsen. Tornadoen ramte på en dag med spredt tordenaktivitet over Danmark, så der var ikke umiddelbart noget unormalt ved situationen. Den konklusion, at det faktisk var tale om en tornado, blev derfor baseret på blandt andet en video, der var optaget fra en bil, der kørte i området (hvor føreren troede, at det var røg fra en brand, han så) samt en nærmere analyse af vejsituationen den pågældende dag.

Foto: Verner Light.

Artiklen er en redigeret udgave af en artikel oprindeligt bragt i *Vejret* 168.

#### Videre læsning:

TSUNAMI: *Risikovurdering for danske, færøske og grønlandske farvande*. DMI - Teknisk Rapport no. 05-08, marts 2005.

Tornado warning system has come a long way, but it could be better (usatoday.com)

[www.dwd.de/DE/wetter/thema\\_des\\_tages/2021/7/19.html](http://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2021/7/19.html)

få eksempler på "rigtige tornadoer" (i ESWD ryger både tornadoer og skyphopper i samme kasse). De store landmasser, som Tyskland udgør og er omkranset af, kan nemlig fungere som gigantiske kogeplader, som kraftige uvejr kan dannes over. Danmark er til sammenligning ret lille og er omkranset af køligere havvand, så vores kogeplader kan ikke blive lige så voldsomme.

Kigger vi længere ned i Europa, er tornadoer og superceller også en risiko. Det kom der en uhyggelig påmindelse om den 24. juni i år, da en usædvanlig kraftig tornado (set med europæiske briller) dræbte fem mennesker, sårede over 200 og jævnedede adskillige huse med jorden i det sydlige Tjekkiet. Der var i medierne meldinger om, at det var den kraftigste tornado i Tjekkiet historie, men her skal man dog huske på, at mange europæiske tornadoer formentlig aldrig er blevet klassificeret. Men det er nok heldigvis meget sjældent, at en tornado af denne styrke rammer i Europa. Tornadoen blev dannet på en dag, hvor der var mange uvejr over Central- og Østeuropa.

### Behov for tornadovarsling i Danmark?

Den 14. juni i 2019 vendte et "vejr-fænomen" op og ned på to biler på en parkeringsplads ved Aabenraa Sygehus. Umiddelbart kunne man ikke fastslå årsagen. Men da en video fra en bil, der tilfældigvis kørte i området, fandt vej til medierne, og vejsituation blev nærstudert,

kom der en udmelding om, at det antageligvis var en tornado, der havde ramt.

Tornadoen ramte i øvrigt på en dag med spredt tordenaktivitet over Danmark, hvilket jo er meget normalt for det danske sommervejr. Så der var nok ingen, der ligefrem havde forventet en tornado. Heldigvis kom ingen til skade. Men hvis den samme tornado i stedet havde taget en tur henover en campingplads eller en børnehave, kunne det have kostet menneskeliv. Og det ville formentlig have igangsat en politisk debat samt krav om en risikovurdering for forekomsten af tornadoer i Danmark. En sådan risikovurdering findes for eksempel for tsunamier.

Med den sjældenhed, tornadoer forekommer i Danmark, synes et dansk tornadovarslingssystem måske ikke at være et akut behov. Men da vi går mod et varmere og fugtigere klima, vil chancen for superceller og dermed tornadoer i Danmark antageligt være større om for eksempel 50-100 år end i dag. Men om det vil være nok til, at det opstår et reelt behov for en form for tornadovarslingssystem i Danmark, er svært at sige.

### Tornadovarsling er svært!

I mine 17 år som meteorolog har jeg indtil nu ikke set eller hørt ordet tornado blevet brugt i en officiel vejrudsigt i Danmark. Det er først efter en lokal og voldsom vindhændelse har ramt Danmark, at tornadodiskussionerne har kørt.

Mig bekendt er der heller ikke mange europæiske meteorologiske institutioner, der udsender deciderede tornadovarsler her i 2021. Der findes dog eksempler: For eksempel har Deutsche Wetterdienst (DWD) i Tyskland muligheden for at varsle om tornadoer. Ifølge en tysk meteorolog fra DWD, jeg har kommunikeret med, er det dog yderst sjældent, at denne mulighed benyttes. Oftest vil det ske på dage, hvor et uvejr tidligere har produceret tornadoer.

USA har nok verdens ældste og mest veletablerede tornadovarslingssystem. Det kunne der skrives en hel artikelserie om, men her skal blot nævnes, at der ud over det meteorologiske "fodarbejde" også er en hel del koordinerings- og kommunikationsarbejde i og på tværs af staterne. Og at de amerikanske meteorologer (som formentlig er verdensmestre i tornadovarsling) i gennemsnit "kun" er i stand til at udsende et varsel om en tornado 9 minutter, før den er dannet. Nogle gange udsendes et tornadovarsel først, når tornadoen er på jorden. Samtidig er 70 % af de udsendte tornadovarsler falske alarmer.

Skulle der en dag blive indført et officielt fælles europæisk varslingsystem for tornadoer, vil det derfor komme til at kræve en del ressourcer. Og belært af de amerikanske erfaringer må man altså forvente, at dette varslingsystem vil byde på rigtig mange falske alarmer samtidig med, at det i bedste fald kun vil kunne forudsige en tornado få minutter, før den dannes. Man vil dog flere dage i forvejen kunne lave en generel meteorologisk beskrivelse om, at vejsituationer potentielt kan danne lokale tornadoer et eller andet sted over et større område.

Til sidst kan det også være på sin plads at sige noget om, hvad man bør gøre, hvis man møder en tornado. Her er anbefalingen blandt andet, at man skal holde sig helt væk fra vinduer, og hvis man er i en bil, bør man om muligt forlade den og finde et mere sikkert sted. ■





KØBENHAVNS  
UNIVERSITET



# FORDI DIT STUDIEVALG KRÆVER GOD TID

Det kræver tid og fordybelse at finde den rigtige uddannelse. På Københavns Universitet har du masser af muligheder for at blive klogere på de naturvidenskabelige uddannelser, inden du træffer dit valg.

Du kan blandt andet:

- Tage et Uddannelsestjek
- Deltage i Åbent hus i uge 9
- Blive studerende for en dag
- Se film om uddannelserne

Læs mere om vores naturvidenskabelige uddannelser og dine muligheder på

*[science.ku.dk/ba](https://science.ku.dk/ba)*



Foto: Shutterstock

# MIKROPLAST FRA DÆK

## – hvor stort et problem er det?

**Bildæk er en stor kilde til mikroplast i miljøet – både når dæk slides ved kørsel, når de genbruges til for eksempel kunstbaner, eller når de repareres. Et dansk/kinesisk forskerhold har nu forsøgt at danne sig et overblik over, hvad man ved om plastpartiklerne og deres effekt på dyr og mennesker.**

Om forfatteren



Foto: Mikkel L. Johansson

Birgitte Svennevig, journalist, Det Naturvidenskabelige Fakultet, SDU. birs@sdu.dk



Foto: Jacob F. Hansen

Forskeren Elvis Genbo Xu, økotoxikolog, adjunkt på Biologisk Institut, SDU.

**M**ikroplast finder vej til alle typer økosystemer på Jorden – selv dybhavets bund og sneklædte alpetoppe – og udgør en potentiel sundhedsrisiko for både dyr og mennesker, som kan indtage partiklerne via føde, drikkevand eller fra luften. En af de største kilder til mikroplast i miljøet er bildæk.

Når man snakker om problemet med mikroplast fra bildæk, har både forskere og medier hidtil væ-

ret mest optaget af de partikler, der kommer fra slid på dækkene, når de kører på vejen. Vi har derimod ikke hørt så meget om de partikler, der kommer fra slidte, kasserede dæk, som ofte bliver granuleret og genbrugt som kunstgræsbaner og andre underlag på for eksempel legepladser. Eller om plastpartikler, der dannes, når dæk bliver repareret, for eksempel efter en punktering.

Men alle tre kilder er vigtige, når man skal vurdere, hvordan

mikroplast fra dæk påvirker miljø og sundhed. Det kan der nemlig være meget stor forskel på. Det viser et nyt review, hvor et dansk/kinesisk forskerhold med deltagelse af økotoxikologen Elvis Genbo Xu fra Biologisk Institut ved Syddansk Universitet har analyseret al tilgængelig videnskabelig litteratur om mikroplast fra dæk. De fremsætter på den baggrund nogle bud på, hvad vi i fremtiden bør prioritere at undersøge for at dække hullerne i vores viden om mikroplast fra dæk.

## Mikroplast fra dæk

Der findes et mylder af forskellige dæk beregnet på forskellig brug – tænk bare på forskellen mellem sommerdæk og vinterdæk. Dækkenes præcise kemiske sammensætning afhænger også ganske ofte af den enkelte producent. Man kan dog grundlæggende sige, at et typisk dæk er sammensat af forskellige dele, som er lavet af materialer som naturgummi, kunstigt gummi, nylonfibre, metaltråd og forskellige tilsætningsstoffer.

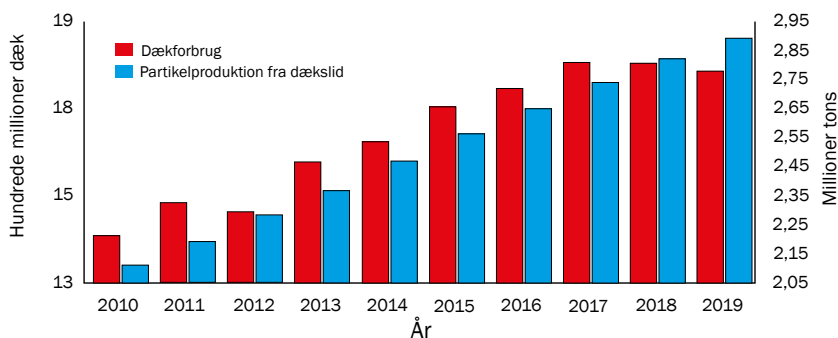
Derudover tilsættes stoffer, som kan forbedre dækkets egenskaber: For eksempel tilsættes såkaldt carbon black som en form for solcreme, der holder solens skadelige ultraviolette stråler fra dækket. Zinkoxid (ZnO) bidrager til slidstyrken, stearinsyre blødgør dækket, svovl bruges til vulkanisering af dæk, og antioxidanter tilsættes for at beskytte dækkene mod forskellige skiftende miljøfaktorer, for eksempel temperatur.

Der findes så mange forskellige dækproducenter, anvendelser og lovkrav i de forskellige lande, at det ikke giver mening blot at tale om mikroplast fra dæk. Realiteten er, at der (næsten) findes lige så mange forskellige mikroplastpartikler fra dæk, som der findes køretøjer, og det kan jo tage pusten fra enhver nok så ihærdig forsker. Det er derfor, at forskerne har valgt at fordele partiklerne i tre hovedgrupper: mikroplast fra henholdsvis slid, genbrug og reparation.

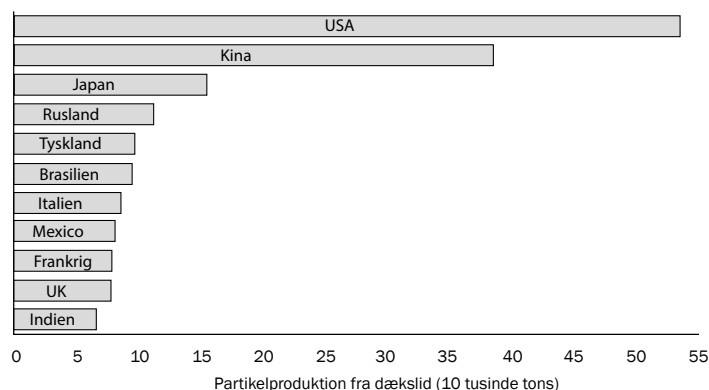
## Hvor store mængder er der tale om?

Mængden og udbredelsen af mikroplast fra dæk i miljøet hænger sammen med, hvor mange dæk, vi producerer, bruger og genbruger. Det er dog umuligt at levere faste tal for, hvor meget mikroplast fra dæk, der havner i miljøet, da så mange faktorer spiller ind: vej-kvalitet, kørebaner, kørt kilometer, håndtering af brugte dæk og lign.

Vi må derfor danne os et billede af omfanget af mikroplastforurening



Grafen viser henholdsvis dækproduktion og den beregnede produktion af mikroplastpartikler ved slid på dækkene for 2010-2019.



Produktionen af mikroplastpartikler fra dækslid fordelt på en række lande.

Kilde: Z. Luo, X. Zhou, Y. Su et al. (2021)

fra dæk ud fra overordnede betragtninger om dækproduktionen og antallet af biler.

Vi ved for eksempel, at mængden af biler i verden er steget fra cirka 1 milliard i 2010 til godt 1,4 milliarder i 2019. Ifølge World Bank var der i gennemsnit 168 biler per 1000 indbyggere blandt verdens lande, hvor USA toppede med 837 biler per 1.000 indbygger.

I takt med efterspørgslen på biler stiger produktionen af dæk selvsagt. Verdens forbrug af dæk steg fra cirka 1,4 milliarder dæk i 2010 til knap 1,8 milliarder dæk i 2019. I 2016 blev der brugt 26,9 millioner tons gummi i dækproduktionen (heraf 12,3 millioner tons naturgummi og 14,6 millioner tons syntetisk gummi).

På globalt plan bliver der årligt sendt 1,5 milliarder brugte dæk videre til affaldshåndtering – ofte til en eller anden form for genbrug.

På baggrund af disse data om dækproduktion og dækforbrug vurderer forskerholdet, at den årlige mængde af mikroplast fra dækslid på verdensplan er steget fra 2,11 millioner tons i 2010 til 2,89 millioner tons i 2019.

Kasserede dæk bliver ofte genbrugt til at lave kunstgræsbaner og lignende typer underlag på for eksempel sportsanlæg og legepladser. I 2015 var det årlige forbrug 1.295.500 tons granulat fra dæk til dette formål.

I Europa bruger vi 80 – 130.000 tons til sportsbaner om året. At der foregår en betydelig udveksling med det omkringliggende miljø understreges af, at det er estimeret, at der eksempelvis i Sverige bruges 2550 tons på nye baner og 1520 tons på gamle baner årligt. Det er også blevet vurderet, at en gennemsnitlig kunstig fodboldbane frigiver omkring 2 tons mikroplast om året.





Vandet fra vejen passerer et regnvandsbassin efterfulgt af et filterbassin.

## Bassiner langs motorveje fjerner mikroplast

I erkendelse af, at biler er en kæmpe kilde til mikroplast, laver Vejdirektoratet netop nu i samarbejde med forskere fra Aalborg Universitet forsøg med at opsamle mikroplast i bassiner langs Herning-motorvejen. Bassinerne er oprindeligt designet til at fjerne tungmetaller og andre miljøfremmede stoffer fra motorvejens overfladevand, men nu fanger de også mikroplast.

På vejen efterlades der årligt cirka fem tons mikroplast fra bildæk for hver kilometer. En del blæser væk, men for den del, der bliver i regnvandet fra vejen, fanges 70-80 procent i bassinerne og de sidste 20-30 procent i nogle særlige filtre, som er blevet etableret. Forsøget løber til udgangen af 2021.

### Hvad sker der med mikroplasten?

De tilgængelige tal for, hvor mikroplast fra dæk havner i miljøet, viser, at der eksempelvis i Holland blev slidt 17.300 tons mikroplast af dæk i 2019. Af dem endte 7.400 tons på vejen, 6.200 tons blev optaget i jorden, 2.300 tons endte i kloaksystemet, 900 tons i luften og 500 tons i overfladevand.

Lignende studier fra Schweiz og Tyskland viser, at de fleste mikroplastpartikler ender på eller i nærheden af vejene, mens kun en mindre del (henholdsvis 30 % og 12-20 %) finder vej til overfladevand og kloaksystemet. Det tyske studie konkluderede også, at der i 2021 ikke fandtes nogle sikre data for, hvor meget mikroplast, der skyldes fra vandløb ud i havet og dermed det marine miljø.

Partikler, der når ud i miljøet, kan have alle mulige størrelser og

former, forskellig overflade, og de kan indeholde mange forskellige tilsætningsstoffer. Alt sammen har det indflydelse på, hvordan de potentielt kan påvirke miljøet. Eksempelvis bliver partiklerne mere ru i overfladen, jo mere de slides af vejr og vind, hvilket dels giver dem en relativt større overflade, dels giver dem en overflade, som endnu mindre partikler lettere kan hæfte sig på.

Ved denne nedbrydning af partiklerne kan for eksempel tungmetaller og blødgørere, som oprindeligt er tilsat dækket ved fremstillingen, blive frigivet til omgivelserne. Herfra kan stofferne gå gennem fødekæden og i sidste ende ophobes i dyr og mennesker.

### Mikroplast kan bære andre skadelige partikler

En af de uheldige egenskaber ved mikroplastpartikler i miljøet er, at de er gode til at suges skadelige

partikler til sig, som sætter sig fast på mikroplastpartiklernes overflade. Denne evne til at adsorbere andre partikler kan ændre sig i takt med sliddet af partiklerne. Et studie har således vist, at gamle og slidte partikler af polyethylen bedre kan adsorbere tungmetaller end nye og uslidte partikler. Det kædes sammen med, at de gamle partikler er anderledes, da de kan være dækket af organisk materiale, oxideret af Solens stråler og dermed have fået ændrede kemiske egenskaber, eller andet ladet materiale kan have sat sig på den.

Ældningsprocessen af forskellige materialer, som kan indgå i dæk, kan være forskellig – for eksempel i forhold til hvilke funktionelle kemiske grupper, der dannes, når partiklerne oxiderer. Med tiden kan det derfor udmønte sig i forskellige egenskaber af den eroderede partikel i forhold til dens evne til at adsorbere skadelige partikler og dermed for dens potentielle skadevirkning.

Umiddelbart vil man forvente, at plastpartikler, der stammer fra dækslid, har en større kapacitet for at adsorbere andre partikler end plastpartikler fra genbrug af dæk på grund af førstnævntes mindre størrelse. Dette er dog svært at bekræfte med kontrollerede laboratorieundersøgelser, da det er svært at skaffe et konsistent prøvemateriale af plastpartikler fra dækslid, der reelt repræsenterer, hvad man finder i miljøet.

Organisk materiale, der sætter sig på partiklerne, kan også have betydelig indflydelse på deres evne til at adsorbere partikler. Effekten kan gå begge veje, idet nogle studier har vist, at partikler, der er dækket af organisk materiale, adsorberer mere effektivt end ikke-dækkede partikler, mens det i andre tilfælde virker omvendt.

Mikroplastpartikler – især slidte partikler med ru overflade – kan også tiltrække mikroorganismer, der for eksempel sætter sig som





På mange ældre kunstgræsbaner til sportsbrug bruger man granulat fra gamle bildæk som ekstra fyld og støddæmpning imellem de grønne plaststrå. Det har været kutyme at efterfylde med granulat, da det "forsvinder" med tiden.

Foto: Shutterstock

biofilm på partiklen. Flere studier i det marine miljø har påvist, at mikroplast kan agere transportmiddel for sygdomsfremkaldende mikroorganismer som virus og bakterier, som på den måde kan spredes i miljøet.

Princippet må formodes at være det samme på land og i luften, mener Elvis Genbo Xu. Det findes der dog kun ganske få studier af. Det er imidlertid et faktum, at virus og bakterier kan overleve adskillige timer eller dage i luften eller på overflader. For eksempel ved vi, at coronavirus kan overleve i op til 3 timer i aerosoler og 2-3 dage på plastikoverflader.

### Hvor farligt er giftstoffer fra mikroplast?

Forskningen har altså vist, at mikroplast fra dæk potentielt kan frigive og adsorbere giftige stoffer, og de kan transportere bakterier og virus rundt. Men er de farlige for menneskers og dyrs sundhed?

Der er lavet flest studier af gift-

stoffer, som frigives af partiklerne, når de er endt i naturen. Studierne har blandt andet set på organismers reproduktion, dødelighed og mobilitet, som er blevet undersøgt i for eksempel grønne alger, dafnier og larver af zebrafisk. De frigivne giftstoffer er blandt andet metaller som zink, bly, cadmium og en række forskellige organiske stoffer som ftalater, forbindelser afledt af thiazol og phenol, hydrocarboner, aromatiske aminer mv.

Generelt viser studierne en lav miljørisiko for vandlevende organismer, som også er dem, der er lavet flest studier af. Vi ved mindre om, hvordan landlevende organismer reagerer. Men generelt tegner der sig et billede af, at landlevende dyr og mennesker tilsyneladende kan leve i et miljø med mikroplast uden at blive påvirket af de stoffer, som partiklerne afgiver, adsorberer eller transporterer.

Studier har også vist, at mikroplast fra kunstgræsbaner ikke virker giftigt på regnorme og jordlevende mi-

kroorganismer. Og giftigheden øges tilsyneladende ikke ved ældning og slid på partiklerne.

Der har i det hele taget været en del fokus på kunstbaner, da bekymringen blandt andet går på, at banerne frigiver stoffer som tungmetaller, PAH, plastblødgørelse og flygtige organiske forbindelser. Der er derfor foretaget flere undersøgelser af kunstbanernes potentielle sundhedsrisiko, blandt andet af US Environmental Protection Agency, Center for Disease Control and Prevention og European Chemical Agency. De konkluderer samstemmende, at eksponeringen for frigivne stoffer kun medfører lav risiko. Lignende studier af 100 hollandske kunstgræsbaner har tilsvarende fundet, at der ikke er en forøget helbredsrisiko ved at spille på banerne.

Mens studierne generelt tyder på, at sundhedsrisikoen fra de frigivne stoffer fra mikoplastik-partiklerne er lille, kan man måske godt bekymre sig mere om giftigheden





Foto: Shutterstock

Små stykker plast i opskyllet på en strand. Medierne skriver ofte om mikroplast fra dæk i havet. Umiddelbart skulle man tro, at det skylles ud i havet med spildevand, men det er faktisk oftest vinden, der transporterer mikroplast-partiklerne fra land til hav.

af selve partiklerne. For eksempel har studier af det lille krebsdyr *Hyalella azteca*, der lever i vegetationen i ferskvandsmiljøer, vist, at både dødelighed, reproduktion og vækst blev påvirket efter 21 dages eksponering for mikroplastpartikler. Derfor mener forskerne, at "partikelgigtigheden" af mikroplastpartikler bør have større opmærksomhed – specielt er effekterne af partikler i nano-størrelse stort set ukendt.

### Svært at konkludere noget entydigt

I lighed med andre typer mikroplastpartikler kan mennesker være eksponeret for partikler fra dæk via indånding, via kontakt med huden og via indtagelse.

Partiklerne kan hænge i luften over trafikerede veje, over fabriker

og værksteder eller andre steder, hvor dæk løbende bliver slidt eller bearbejdet, og her kan der være særlig risiko for at indånde dem.

De studier, der er lavet af mikroplastpartiklers evne til at kunne gennemtrænge de yderste lag af huden, tyder ikke på, at de er i stand til det. Men det er stadig uvist, om det vil kunne lade sig gøre for mikroplastpartikler med bestemte overfladeegenskaber.

Da mikroplastpartiklerne kan ende i alt lige fra bordsalt, flaskevand og fisk til grøntsager, er vores fordøjelsessystem formentlig det sted, hvor de fleste mikroplastpartikler havner i mennesker. Her kan de potentielt krydse tarmvæggen og nå ud i blodbanen og danne et protein-plastikkompleks, fordi par-

tiklerne kan adsorbere proteiner på deres overflade.

Hvis plastikpartiklerne når ud i kroppen, kan de potentielt forstyrre cellulære og molekulære processer. Det er dog begrænset, hvad man ved om, hvordan netop mikroplastpartikler fra dæk opfører sig i vores organisme og dermed for deres potentielle sundhedsrisiko. Disse partikler kan som nævnt have en meget forskellig overfladekemi, og derfor kan det være svært at overføre fund fra andre typer af plastik til dækpartikler.

Samlet set mener forskerne derfor, at det er svært at konkludere noget entydigt om sundhedsrisikoen for mennesker, fordi der er en udtalt mangel på pålidelige data om eksponering, begrænsede prøvestørrelser og/eller antal undersøgte stoffer samt epidemiologiske studier mv.

### Fokus på de landlevende organismer

Elvis Genbo XU fra Syddansk Universitet, der er en af forskerne bag reviewet, tilføjer for egen regning, at da de fleste partikler fra dæk forbliver på land, er han bekymret for de landlevende organismer.

Han mener også, at meget mere af forskningen bør fokusere på, hvad der sker, når organismer optager plastikpartiklerne, da reviewet jo viser, at der er begrænset risiko forbundet med at blive udsat for de stoffer og patogener, som partiklerne kan frigive til eller transportere rundt i miljøet. Organismer kan optage partikler, der er mindre end 10 mikrometer, så det er en vigtig størrelse at holde øje med.

Men i øjeblikket aner vi intet om de forskellige partikelstørrelser i de mikroplastkilder, vi er omgivet af. Vi ved for eksempel kun, at der efter et bestemt tidsrum er forsvundet et vist antal kilo mikroplast, men det siger ikke noget om partiklernes størrelse. ■

#### Videre læsning:

Artiklen er baseret på Z. Luo, X. Zhou, Y. Su et al (2021): Environmental occurrence, fate, impact, and potential solution of tire microplastics: Similarities and differences with tire wear particles. *Science of the total environment*. 795





# UNDERVISNING ON DEMAND

## Tag universitetsforskning med ind i din undervisning

På AAU's streamingunivers AAU Play finder du korte videoforelæsninger med forskere fra AAU og tilhørende opgavesæt til en lang række gymnasiefag – du kan bruge materialet, som det passer ind i din undervisning.

Universet bliver løbende udvidet, men allerede nu er der 41 videoer online, som bl.a. handler om konkrete emner inden for biologi, innovation, medier, teknologi, kemi, fysik, bæredygtighed, matematik og meget mere!

BESØG OS PÅ [AAU.DK/AAU-PLAY](https://www.aau.dk/aau-play)

**AAU PLAY**

Integrér AAU-forskere  
i din undervisning



**AALBORG UNIVERSITET**  
AALBORG ESBJERG KØBENHAVN



# HVAD DØR DANSKERNE AF?

Dødsårsager i et dataanalytisk perspektiv

## Forfatterne



Tony Lung Ca Hin  
tonyhin48@gmail.com



Laura Marie Lynggaard  
Nilsson  
lauranilsson@icloud.com



Laura Horsfall Folmer  
laura\_h\_folmer@hotmail.com

Alle er studerende på  
Datavidenskab ved  
Aarhus Universitet.



Vejleder: Palle Villesen,  
lektor i Bioinformatik,  
Aarhus Universitet  
palle@birc.au.dk

Hvert år dør over 50.000 danskere. Med udgangspunkt i offentligt tilgængelige statistikker kigger vi her på, hvad disse kan fortælle om døden i Danmark.

**D**øden skal som bekendt have en årsag, og tager man en tur gennem historien har dødsårsagerne for mennesket varieret meget – nogle helt naturlige og andre mere eller mindre selvforskyldte. I Danmark har vi været relativt privilegerede de seneste mange år, hvad angår ekstraordinære dødsårsager som krig, hungersnød og naturkatastrofer. Og dog har vi siden starten af 2020 skullet forholde os til noget, verdenshistorien med sjældenhed oplever: en pandemi. I takt med, at coronapandemien har gjort sit indtog i vores hverdag, har vi haft et vidtgående fokus på død og sygdom. Det er en virkelighed ulig den, vi kender, og det kan give et indtryk af, at vi i Danmark i øjeblikket oplever en dødelighed som aldrig før. Men hvad dør danskerne egentlig af?

Vi er tre studerende fra Datavidenskab på Aarhus Universitet, der har lavet et projekt, hvor vi analyserer

offentligt tilgængelig data fra Dødsårsagsregistret fra 2019 (nyeste tilgængelige data) og Danmarks Statistik fra 2020-2021 for at se, hvad disse data kan fortælle om dødsårsager og dødelighed i Danmark. Med udgangspunkt i tre væsentlige faktorer – alder, køn og geografisk tilhørsforhold – har vi undersøgt, hvorvidt der kan identificeres væsentlige forskelle i dødsårsagerne på tværs af aldersgrupper, biologisk køn og regioner. Hvad dør danske unge for eksempel af? Er det overvejende mænd, der dør af ulykker? Er dødsårsagerne meget forskellige fra region til region? Foruden at undersøge de generelle dødsårsager på baggrund af alder, køn og region, har vi undersøgt dødeligheden under coronapandemien for henholdsvis yngre og ældre danskere.

## Hvordan ændrer dødsårsagerne sig med alderen?

Kigger vi på spædbørnsdødeligheden er denne relativt lav i Danmark sammenlignet med mange andre

lande, men statistikken viser alligevel, at de første dage af vores liv hører til de farligste. Den samlede dødsrate for aldersgruppen 0-4 år er faktisk så høj, at man først rammer et lignende niveau igen omkring alderen 35-39 år. Meget tyder altså på, at vi er særligt sårbare helt i starten af livet. Indenfor aldersgruppen 0-4 år kan de fleste dødsfald tilskrives sygdomme, der opstår i den perinatale periode (i forbindelse med fødsel) og derudover medfødte misdannelser og kromosomanomalier.

Når først vi har overkommet den barriere, i særdeleshed det første leveår, ser vi ganske få dødsfald indtil teenageårene. Derefter er de hyppigste dødsårsager i aldersspændet 15-44 år selvmord og selvmordsforsøg, ulykker og kræft. Det er overraskende for os, at ulykker og selvmord er i top tre i alle disse grupper, men en forklaring kunne være, at folk i netop dette interval generelt er sunde og

# Et overblik over udviklingen af hyppige dødsårsager

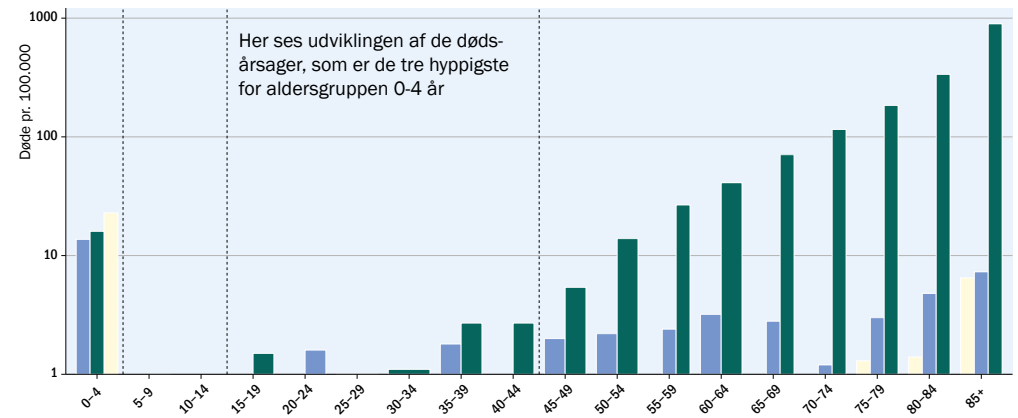
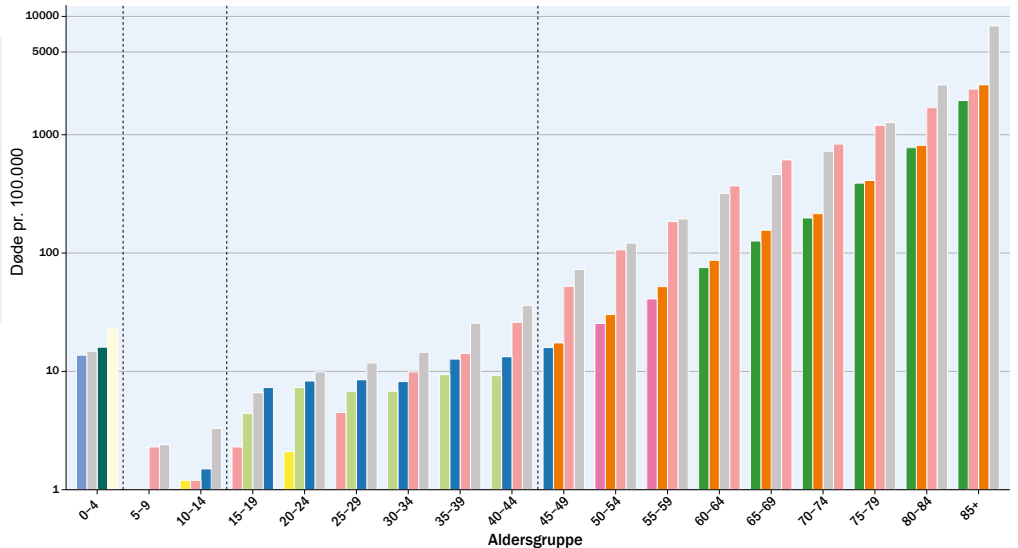
## Dødsårsager

- Andet
- Dødsattester uden medicinske oplysninger
- Hjertesygdomme
- Kræft
- Medfødte misdannelser og kromosomanomalier
- Selvmord og selvmordsforsøg
- Sygdomme i fordøjelsesorganer
- Sygdomme i nervesystemet og sanseorganerne
- Sygdomme i åndedrætsorganer
- Ulykker
- Visse sygdomme, der opstår i perinatalperioden

Figuren øverst viser dødsraterne for de tre hyppigste dødsårsager indenfor hver aldersgruppe i 2019 på en logaritmisk skala. Den grå søjle, "Andet", er summen af de resterende dødsårsager i aldersgruppen. De tre lodrette linjer i plottet angiver de tydelige skel, vi ser i årsagerne. For aldersgruppen 5-9 år ses kun to søjler, hvilket skyldes, at de to øvrige dødsårsager i top tre har en rate på 1.

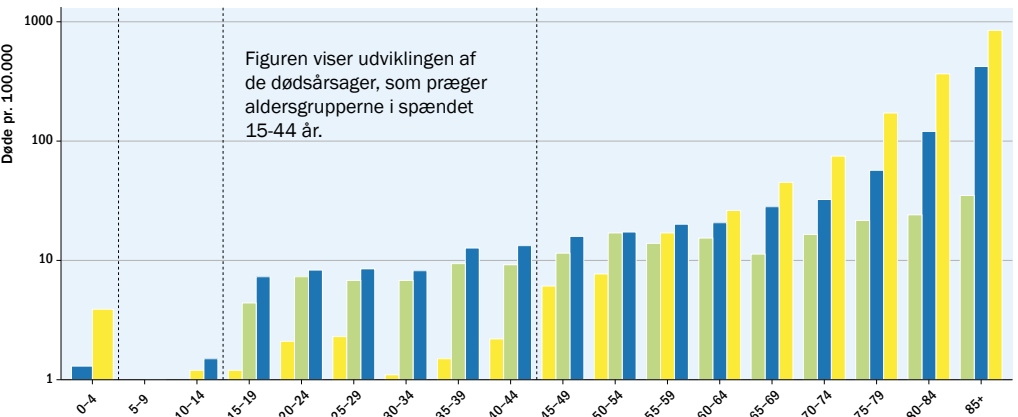
En væsentlig pointe er, at en dødsårsag, der optræder i en specifik aldersgruppe, ikke nødvendigvis forsvinder, blot fordi den ikke er blandt de dominerende dødsårsager for de øvrige aldersgrupper. Dette illustreres i de nederste figurer.

Bemærk, at flere af dødsårsagerne udviser en tilnærmelsesvis lineær stigning med alderen på den logaritmiske skala, hvilket svarer til eksponentiel vækst.



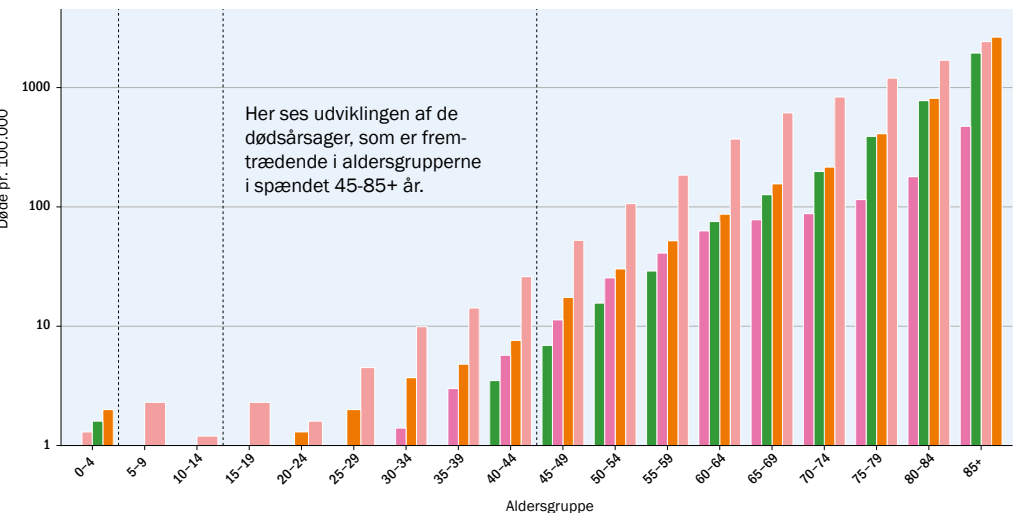
raske, og derfor dør af andet end sygdom.

Det samme kan dog ikke siges om den ældre del af befolkningen. Allerede fra aldersgruppen 45-49 år ser vi en begyndende tendens til, at dødsårsager, der kan tilskrives sundhedsmæssige komplikationer, dominerer – dødsårsager som hjertesygdomme, sygdomme i åndedrætsorganer, kræft mm. Tilsyneladende dør de ældre i meget højere grad som direkte følge af sygdom, hvilket de fleste nok også ville have forventet.



## Dødsårsagernes udvikling gennem livet

Helt generelt stiger dødsraten eksponentielt med alderen – det vil sige, at sandsynligheden for at dø fordobles med nogenlunde faste intervaller i et livsforløb. Kigger man på udviklingen af de mange forskellige dødsårsager følger de også næsten alle en eksponentiel tendens. Tag for eksempel kræft,





## Fordelingen af dødsårsager i 2019

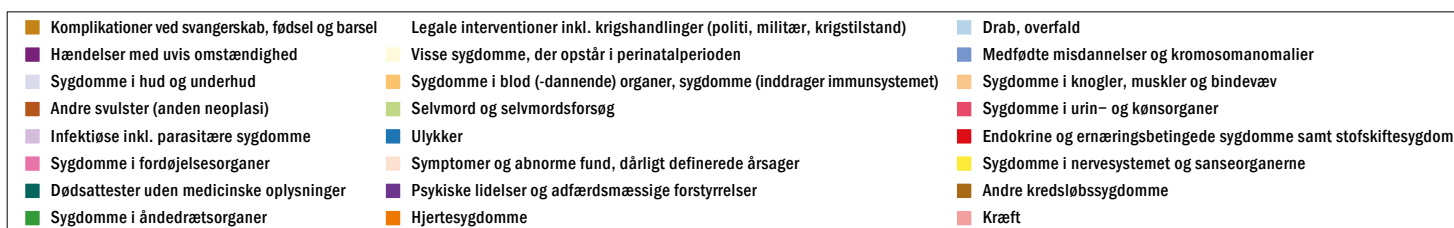
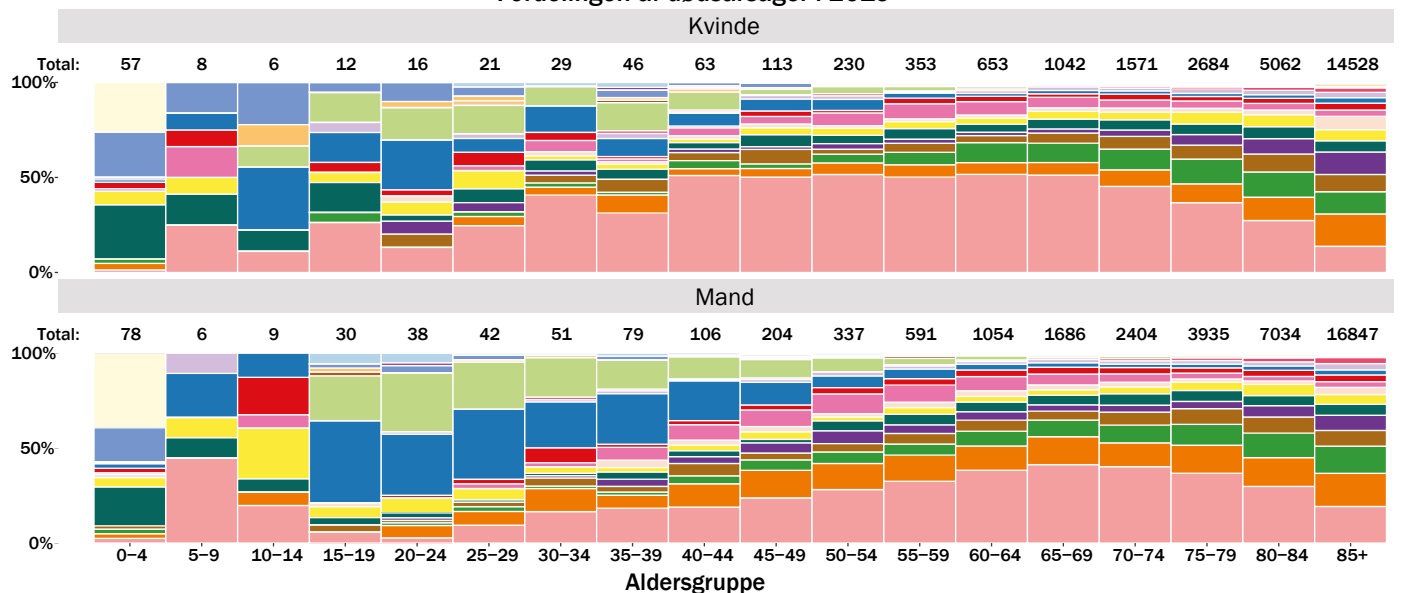


Fig 2. Et overblik over fordelingen af dødsårsager i 2019. Figuren viser, hvor stor en andel hver enkelt dødsårsag udgør af den totale rate for en given aldersgruppe. Figuren er kønsopdelt med kvinder i den øverste del og mænd i den nederste. Over hver aldersgruppe angives det totale antal døde per 100.000 borgere i den pågældende gruppe,

rundet op til nærmeste heltal. Disse totaler indgår for at understrege, at der er stor forskel på, hvor mange der dør i de forskellige aldersgrupper. Figuren viser med al tydelighed, hvordan ulykker samt selvmord- og selvmordsforsøg udgør store andele for de yngre aldersgrupper, mens en sygdom som kræft følger os som en fremherskende dødsårsag igennem stort set hele livet.

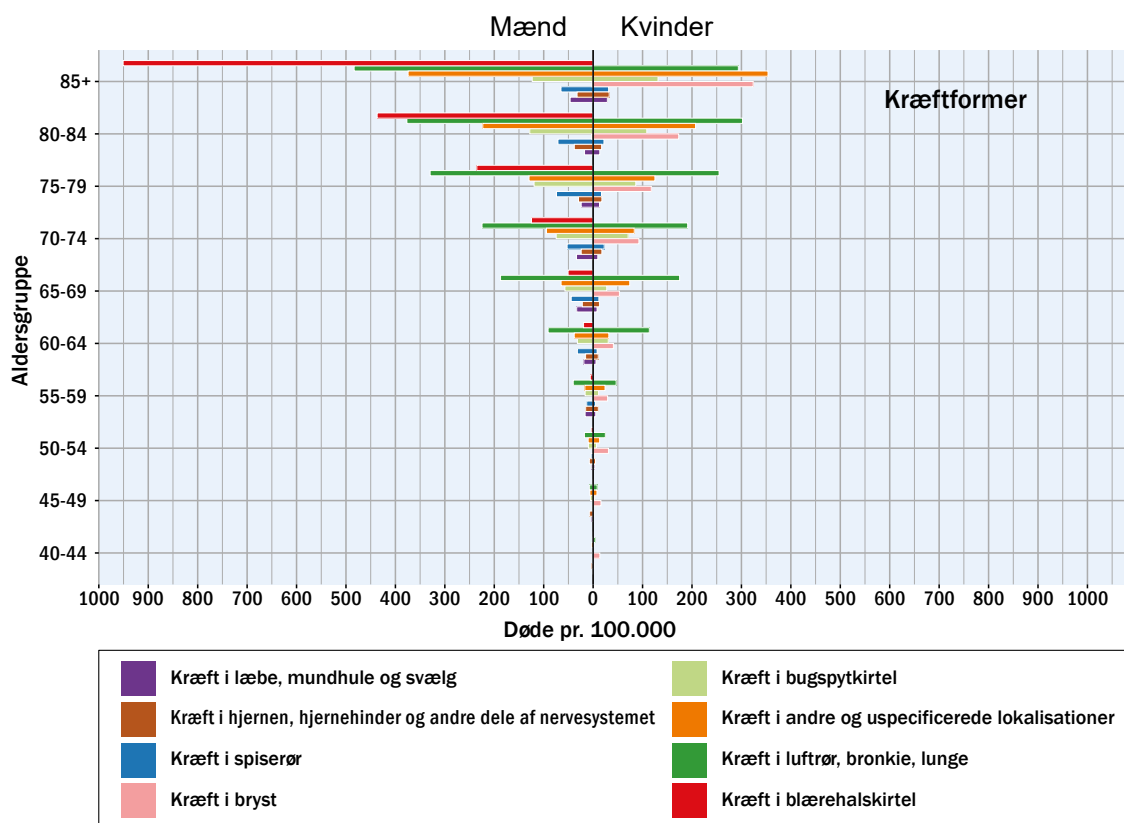


Fig 3. Figuren viser udviklingen af fremherskende kræftformer for henholdsvis mænd (venstre side af figuren) og kvinder (højre) fra 40-årsalderen og frem. Yngre aldersgrupper er udeladt, da raterne for dem er relativt små.

hvor sammenhængen mellem alder og dødsraten netop er tilnærmelsesvist eksponentiel. Er man således i aldersgruppen 75-79 år er dødsraten for kræft cirka ti gange større end for de 50-54 årige, mens dødsraten for de 50-54 årige igen er cirka ti gange større end for de 30-34 årige. Det samme eksponentielle mønster kan også iagttages for hjertesygdomme og sygdomme i åndedrætsorganerne blandt mange andre. Lidelser, som man måske også intuitivt forbinder med en højere alder. Selvom udviklingen af dødsraten for disse årsager kan være påfaldende, giver det formentligt god mening, når man tænker over, at større andele dør i de ældre aldersgrupper end de unge.

Det er dog ikke alle dødsårsager, hvor dødsraten stiger eksponentielt med alderen. Kigger man for eksempel på selvmord, kan man med god tilnærmelse sige, at dødsraten er relativt konstant, sammenlignet med eksempelvis kræft. Også for ulykker er raten ret konstant det meste af voksenlivet, men stiger ret voldsomt i de sidste aldersgrupper.

### Dør mænd og kvinder af det samme?

Når vi ser på, hvad mænd og kvinder dør af, er der ved første øjekast ikke de store forskelle. Begge køn dør af de samme årsager – dog er der variation i, hvor dominerende en dødsårsag er for hvert køn.

Som tidligere nævnt fylder ulykker og selvmord meget i de yngre aldersgrupper. Deler vi det op på køn, kan vi se, at for mænd i hver aldersgruppe i spændet 15-29 år skyldes cirka 1/4 af dødsfaldene selvmord, mens cirka 1/3 skyldes ulykker. Dette gør selvmord og ulykker til væsentligt mere dominerende dødsårsager for mænd end for kvinder i samme aldersspænd, hvor selvmord udgør cirka 1/6 og ulykker henholdsvis cirka 1/6, 1/4 og 1/10 for hver af de tre aldersgrupper. Ulykker og selvmord fortsætter med at fylde en hel del

for mænd, men andelen for begge køn bliver gradvist mindre med alderen i takt med, at vi også dør af andre ting. I omtrent samme aldersspænd, dvs. 30 år og opefter, ses det, at død forårsaget af hjertesygdomme begynder at fylde en næsten fast andel for mænd, mens det for kvinderne generelt er en mindre fremherskende dødsårsag.

Kræft udgør den største andel af alle dødsfald og er dominerende for både mænd og kvinder. For kvinder i aldersgrupperne i spændet fra 40-69 år kan dødsårsagen i over halvdelen af tilfældene tilskrives kræft. Dog er dødsraten for de yngste aldersgrupper af det spænd lav, sammenlignet med raten for de ældste aldersgrupper. Ser man nærmere på kræft i Dødsårsagsregistret kan man få oplysninger om de enkelte kræfttyper.

Her ses det, at to af de fremherskende kræftformer, kræft i blærehalskirtlen (prostatakræft) og brystkræft, er henholdsvis helt og delvist kønsbetingede. Blærehalskirtlen findes ikke hos kvinder, hvorimod brystkræft rammer begge køn – dog er det særdeles sjældent hos mænd, men en hyppig dødsårsag for kvinder. For kvinder i aldersgrupperne i spændet 40-55 år er brystkræft den hyppigste kræftrelaterede dødsårsag, og den er fortsat hyppig i de ældre aldersgrupper.

For kræfttyper, der rammer mænd, er kræft i mundhulen, hals, svælg og spiserør mere fremtrædende end for kvinder. Hvad angår prostatakræft viser det sig som dødsårsag hos mænd senere end brystkræft gør for kvinderne. Den dukker op som dødsårsag for aldersgruppen 50-54 årige mænd og stiger voldsomt derefter. Fra aldersgruppen 80-84 år er det den mest hyppige kræftrelaterede dødsårsag. Selvom dødsraterne som sagt vokser eksponentielt for kræft, falder raternes andel af totalen hos begge køn frem mod den sidste aldersgruppe, i takt med at andre dødsårsager kommer i spil.

### Regionale forskelle

Når vi undersøger, om der er en geografisk variation i dødsårsagerne er det vigtigt at bemærke, at befolkningssammensætningen med hensyn til alders- og kønsfordeling ikke er ens i de forskellige regioner. Der er eksempelvis relativt stor aldersforskel på Region Hovedstaden, som med en gennemsnitsalder på 40,3 år er den yngste region, og Region Sjælland, der med en gennemsnitsalder på 44,3 år er den ældste region. Tilsvarende er der en overvægt af kvinder i Region Hovedstaden, hvor kvinderne udgør cirka 51 procent af befolkningen, mens det modsatte er tilfældet i Region Nordjylland, hvor mænd udgør cirka 51 procent. Allerede på denne baggrund har vi altså som følge af de tendenser, vi har udforsket tidligere, en oplagt antagelse om, at disse forskelle vil have direkte indvirkning på dødsårsagerne i de enkelte regioner.

Nærstuderer man data, kan man konstatere, at Region Sjælland skiller sig ud i negativ forstand. Regionen har den højeste dødsrate for 12 ud af 21 dødsårsager, mens raten er højere end den nationale rate for hele 18 ud af 21 dødsårsager. Med 1075 døde per 100.000 borgere årligt, har Region Sjælland da også den højeste totale dødsrate, når man betragter summen af raterne for alle dødsårsager. Som bemærket indledningsvist er det dog i et vist omfang forventeligt, at regionen med den højeste gennemsnitsalder tilsvarende har den højeste dødelighed.

I den modsatte ende af spektret finder vi Region Hovedstaden, som for 15 ud af 21 dødsårsager har en lavere dødsrate end den nationale, samt den laveste totale rate med 824 døde per 100.000 borgere årligt. På baggrund af disse aldersmæssige yderpunkter, Sjælland og Hovedstaden, er alder altså igen, ikke overraskende, en afgørende faktor, når det gælder dødsårsager.





Fig 4. I figuren illustreres antal døde per 100.000 borgere i hver af de fem regioner for hver dødsårsag sammenholdt med den tilsvarende nationale rate. Det umiddelbare visuelle indtryk er, at regionerne følger nogenlunde samme mønster, hvor kræft tegner sig for den højeste rate, efterfulgt af hjertesygdomme, sygdomme i åndedrætsorganer og så fremdeles.

Foruden de forskelle, som skyldes variationer i befolkningens sammensætning, synes der dog ikke (på baggrund af dette datagrundlag) at være væsentlige forskelle på tværs af regionerne. Konklusionen er således, at Danmark, på regional basis, er et relativt ensartet land, hvad angår dødsårsager.

### Coronaens effekt

Vi har nu set, hvilke dødsårsager, der generelt bidrager til dødeligheden i Danmark. I 2020 stiftede vi dog bekendtskab med en ny dødsårsag: COVID-19. Størstedelen af danskerne er formentlig klar over, at pandemien har ramt den ældre del af befolkningen hårdest, hvad angår dødelighed, men hvor stor har effekten reelt været, og hvordan er det gået for den yngre del af befolkningen?

De fleste coronarelaterede datasæt kræver relativt stor forsigtig-

hed og baggrundsviden at beskæftige sig med, idet der er adskillige kilder til usikkerhed, såsom ændring i opgørelsesmetode, ændring i teststrategi m.v. På den baggrund har vi valgt alene at forholde os til statistikkerne for antal døde – uagtet om dødsfaldene er coronarelaterede eller ej – for at se, om 2020 skiller sig ud sammenholdt med forudgående år.

Alt andet lige afhænger antallet af dødsfald af årstiden, og tendensen er, at der dør flere i vintermånedene. Dette gælder helt generelt for alle år, uden hensyntagen til den nuværende pandemi. Intuitivt er dette ikke overraskende, da lidelser som influenza og lungebetændelse, der kan være livstruende for ældre og svage, er mere udbredte i de kolde måneder. Disse sygdomme kategoriseres som sygdomme i åndedrætsorganer, og som vi tidligere har set, hører disse til blandt

de væsentligste dødsårsager for ældre.

I lyset heraf er det værd at bemærke, at året faktisk starter godt for den ældre del af befolkningen med hensyn til antallet af døde – faktisk ligger ikke én eneste uge over gennemsnittet frem til den første nedlukning af Danmark den 11. marts.

Umiddelbart herefter ser vi de første “dårlige uger”, og især uge 14-15, hvor også sundhedsmyndighederne har konstateret generel overdødelighed i Danmark, ligger betydeligt over gennemsnittet. Herefter ser vi en længere periode, hvor der ikke kan identificeres en entydig tendens i forhold til antallet af døde.

Den næste bemærkelsesværdige periode starter omkring uge 43, hvor vi igen kan konstatere en klar

## Dødelighed før og under corona-pandemien

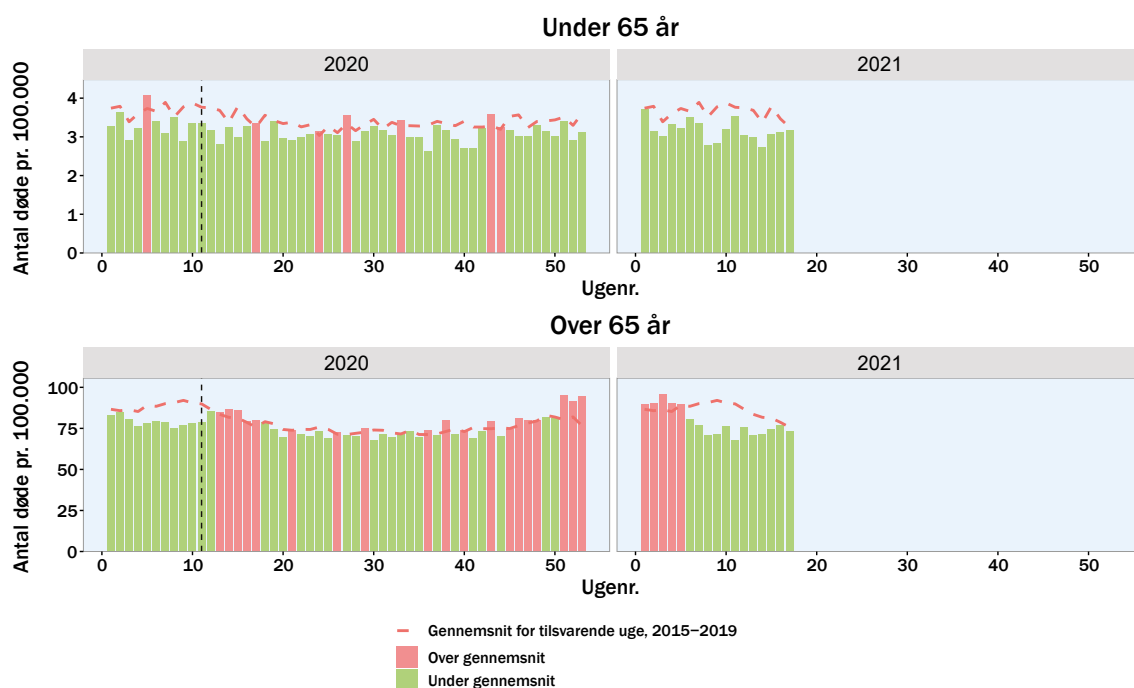


Fig 5. Hvis man har fulgt corona-pandemiens udvikling, har man formentlig stiftet bekendtskab med begrebet overdødelighed. I den simpleste forstand defineres overdødelighed blot som en dødelighedsprocent, der er større end den gennemsnitlige. Sundhedsfaglige eksperter bruger relativt komplekse modeller til at modellere den forventede dødelighed og eventuelle afvigelser herfra – omvendt har vi her forsøgt os med den simpleste mulige tilgang. Aldersfordelingen i Dan-

mark ændrer sig over tid, og tendensen er, at befolkningen bliver ældre. Det er derfor nødvendigt at vælge en metode, der tager højde for dette. For henholdsvis den yngre og den ældre aldersgruppe sammenligner vi således antallet af døde per 100.000 borgere på ugebasis i 2020-2021 med det tilsvarende gennemsnit for årene 2015-2019. Røde uger indikerer højere dødelighed end gennemsnittet, mens grønne uger indikerer det modsatte.

overvægt af dårlige uger. Særligt omkring årsskiftet, hvor pandemien for alvor havde tag i Danmark, ser vi en serie af uger, hvor antallet af døde er særdeles højt. Omvendt opmuntrende er det dog, at vi fra uge 5 i 2021 indtil videre udelukkende har observeret grønne uger, hvilket – hvis man tager de positive briller på – kunne tyde på, at den nye nedlukning i samspil med vaccinationsprogrammet har haft en effekt.

I modsætning til den ældre del af befolkningen har de yngre generelt haft et særdeles godt år med et fåtal af dårlige uger. Intet er så skidt, at det ikke er godt for noget, og den nedsatte aktivitet i samfundet har altså tilsyneladende været gavnlige for de yngre, hvis vi altså udelukkende betragter antallet af døde.

Sammenligner man antallet af

gode og dårlige uger hos henholdsvis den yngre og den ældre del af befolkningen, er det oplagt at antage, at corona har været en væsentlig dødsårsag for de ældre – ikke mindst, når vi husker, at sygdomme som influenza har haft særdeles svære vilkår som følge af øget fokus på hygiejne og afstand, hvorfor disse sædvanlige årsager kun har bidraget til antallet af døde i begrænset omfang under pandemien.

### Pandemiens perspektiver

Dødsårsagsregistrets data for 2020 bliver tidligst tilgængelig for offentligheden ultimo 2021, så vi kan endnu ikke udtømmende sige, hvilke dødsårsager der kan tilskrives færre dødsfald som følge af dette noget usædvanlige år. Dog har flere offentlige instanser allerede nu offentliggjort foreløbige tal, som kan medvirke til forklaringen. Eksempelvis oplyser Vejdirektora-

tet således, at antallet af dræbte i trafikulykker faldt fra 199 til 155 fra 2019 til 2020 – et betydeligt fald på hele 22 procent.

Det endelige billede vil kunne ses, når data for 2020 udkommer. Til den tid vil det være interessant at se, om nedlukningerne, det øgede fokus på hygiejne og bevidsthed om smitte har haft en indflydelse på andre dødsårsager.

Ligeledes bliver det interessant at se de langsigtede konsekvenser af pandemien. Får vi for eksempel mildere influenzasæsoner? Har nedlukninger og isolation påvirket befolkningens mentale helbred i en sådan grad, at det vil medføre flere selvmord? Har færre lægebesøg været medvirkende til, at flere går rundt med ikke-diagnosticerede og potentielt dødelige sygdomme? Dette og mere vil fremtidens data vise. ■

# HELIUM- NANODRÅBER OG FRIELEKTRONLASERE - det perfekte match

## Om forfatterne



Jakob Dall Asmussen er cand.scient i nanoscience og ph.d.-studerende. [dall@phys.au.dk](mailto:dall@phys.au.dk)



Björn Bastian har en ph.d.-grad i eksperimentalfysik og er nu postdoc [bbastian@phys.au.dk](mailto:bbastian@phys.au.dk)



Ltaief Ben Ltaief har en ph.d.-grad i eksperimentalfysik og er nu postdoc [ltaief@phys.au.dk](mailto:ltaief@phys.au.dk)

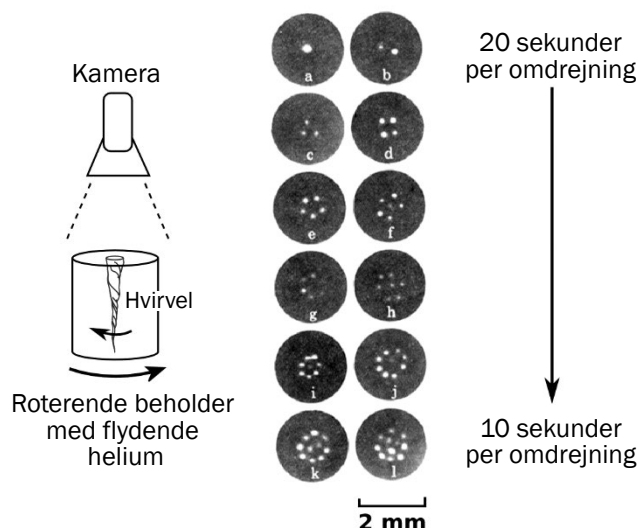


Marcel Mudrich har en ph.d.-grad i eksperimentalfysik og er nu lektor [mudrich@phys.au.dk](mailto:mudrich@phys.au.dk)

Alle ved Cluster-Dynamics-Group, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Helium kan bruges til meget mere end festballoner og sjove stemmer. Ultrakolde nanodråber af superflydende helium kan bruges som nanolaboratorier til at undersøge indlejrede partikler. Og bruger man frielektronlasere til sine undersøgelser, åbner der sig helt nye muligheder for at få indsigt i fundamentale kemiske og fysiske processer.

**H**elium kender vi alle sammen som en farveløs gas, der får balloner til at flyve højt op i himlen og får din stemme til at lyde som Mickey Mouse. Vi kender desuden helium fra fysik- og kemitimerne som det andet grundstof i det periodiske system, hvor det tilhører gruppen ædelgasser, som er inerte og ikke reagerer med de andre grundstoffer. Men helium findes også i væskefasen, når det afkøles til meget lave temperaturer. Ved en temperatur under 2,18 Kelvin, det vil sige nær det absolutte nulpunkt på temperaturskalaen, bliver helium endda til en virkelig ekstraordinær væske kaldet en supervæske. Denne specielle fase har mange unikke egenskaber, der stammer fra den kvantemekaniske karakter af heliumatomer ved lave temperaturer: Superflydende helium strømmer uden nogen friktion, det kan klatre op på containervæggene, gemme og lede varme ekstremt effektivt, og mest forbløffende kan det ikke strømme i cirkler. Hvis man for eksempel roterer en be-



Fotografier af stabile kvantehvirvelstrømme i en lille roterende beholder fyldt med superflydende helium. Hvirvelstrømmene er synlige ved at afbillede elektroner fanget i kvantehvirvelstrømmene på en fosforskærm.

holder med superflydende helium, arrangerer væsken sig selv i små kvantehvirvelstrømme i regelmæssige mønstre (se figur). Dette fænomen er blevet undersøgt for flere årtier siden, og det meste ved superflydende helium er nu godt forstået.

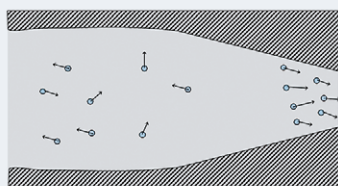
## Køling af nanopartikler med superflydende helium

I dag bruges superflydende helium for det meste som kølemiddel, når ekstremt lave temperaturer skal opnås, for eksempel til afkøling af superledende magneter i partikelacceleratorer og til drift af den nyeste

Reprinted figure with permission from E. J. Yarmchuk, M. J. V. Gordon, and R. E. Packard. Phys. Rev. Lett. 43, 214 (1979). Copyright (2021) by the American Physical Society.

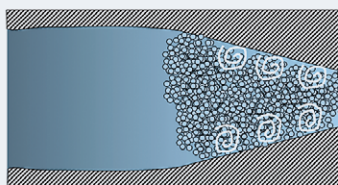
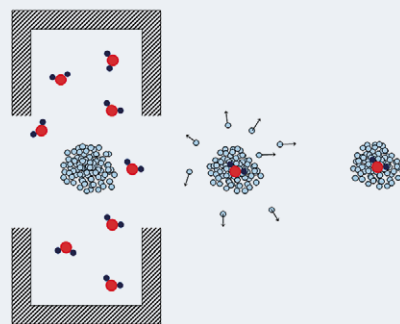


## Sådan laver vi helium-nanodråber



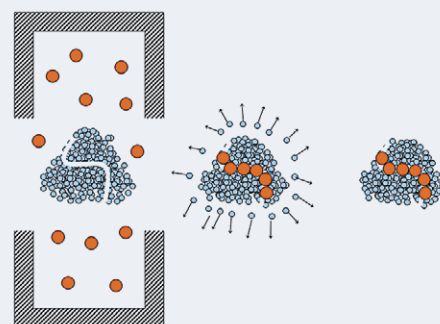
Helium-nanodråber dannes ved at blæse afkølet heliumgas ud i vakuum fra en dysse. Den afkølede gas vil kondensere til små klynger af helium og videre til nanodråber. Nanodråberne vil afkøle sig selv til en ultrakold temperatur (~0,4 K) ved at fordampe helium-atomer af dråben. Helium-nanodråben består af mellem 1.000 og 100.000 atomer afhængig af trykket af heliumgas i dysen og temperaturen af dysen. Ønsker vi at tilføje

andre atomer eller molekyler i dråben, kan vi lade nanodråben flyve igennem en dopingcelle, der indeholder det fremmede atom eller molekyle. Helium-nanodråber er "klistrede" og vil samle andre atomer og molekyler op. Denne opsamling giver energi til dråben i form af varme, som dråben vil kompensere for ved at fordampe yderligere helium-atomer fra. Dermed vil det nu være muligt at undersøge atomet eller molekylet i et ultrakoldt miljø.



Hvis vi vil lave eksperimenter med endnu større helium-nanodråber, kan vi afkøle dysen endnu mere, så heliumgassen kondenserer allerede i dysen. Dermed vil det være en heliumvæske og ikke en heliumgas, som vi blæser ud i vakuum. Væsken vil brydes op i dråber, som består af mellem 1.000.000 og 100.000.000 heliumatomer efter afkøling. Dråben vil kunne begynde at rotere som effekt af interaktion med dysens kanter,

hvormed der vil dannes kvantehvirvelstrømme i dråben, når den afkøles til den superflydende fase. Hvis vi doper fremmede atomer i de store nanodråber med kvantehvirvelstrømme, vil disse atomer blive tiltrukket af hvirvelstrømmene og sætte sig i dem. Det kan hjælpe os med bedre at se hvirvelstrømmene, da de indlejret atomer vil fungere som en kontrastvæske, når vi tager et billede af dråben.



generation af kvantecomputere. Men i mange forskningsgrupper rundt om i verden har det været et mål at afkøle molekyler eller nanopartikler i superflydende helium for på den måde at kunne studere partiklerne i et afkølet og ikke-reaktivt miljø. Det afkølede miljø vil gøre, at vi vil kunne undersøge partiklernes egenskaber og kontrollere dem med meget højere præcision end ved stuetemperatur.

Hvis man forsøger at injicere partikler i superflydende helium, klæber de straks fast til beholdervæggene eller til hinanden og danner større aggregater, der synker til bunds i

beholderen. Den eneste løsning er at producere små dråber af superflydende helium i vakuum, som derefter hver kan indeholde et atom eller molekyle. Sådanne små helium-dråber kan ganske let produceres ved at blæse kold heliumgas under højt tryk ind i vakuumet. Størrelsen af dråberne kan varieres fra en radius mindre end 1 op til adskillige 100 nm (en nanometer er en milliardtedel af en meter) bare ved at kontrollere temperaturen på den lille dysse, hvorfra heliumstrømmer. Når en sådan stråle af helium-nanodråber derefter bevæger sig gennem et tilstødende vakuumkammer, der indeholder en

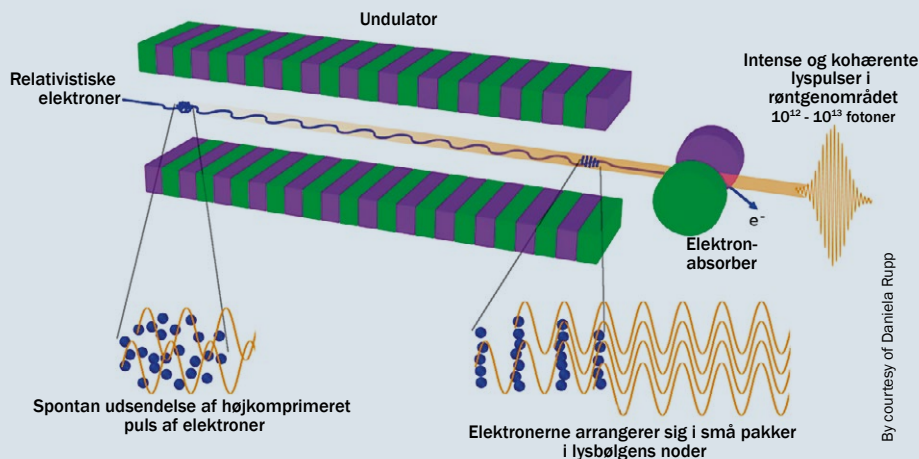
gas af en anden type atomer eller molekyler, kan hver heliumdråbe samle et eller flere af disse atomer eller molekyler op og tage dem med hen til det område af apparatet, hvor den aktuelle måling udføres. Målingen sker for eksempel ved at belyse den dopede dråbe med en laserstråle og detektere udsendt lys eller ladede partikler.

### Er helium-nanodråber superflydende?

Men før vi går videre med molekyler eller nanopartikler indlejret i helium-nanodråber, lad os stille spørgsmålet, om helium-nanodråber dannet på denne måde overho-

## Frielektronlasere

En frielektronlaser (XFEL) består i det væsentlige af en stråle af elektroner, der bevæger sig med en fart tæt på lysets hastighed gennem et arrangement af magneter med skiftende poler kaldet en undulator. Den kraft magnetfeltet udfører på elektronerne får dem til at svinge sidelæns, når de flyver gennem undulatoren, hvilket inducerer udsendelse af lys, såkaldt synkrotronstråling. I en frielektronlaser er strålingsfeltet så intenst, at det kobles tilbage til elektronerne og får dem til at arrangere sig i små pakker (microbunches) i lysbølgens noder. Når dette sker, er det udsendte lys meget intens og kohærent. Det vil sige, at det har de samme egenskaber som laserlys, men modsat en



almindelig laserpegepind, så udsender denne laser røntgenstråling.

Det erklærede mål med disse enorme lasere er at optage billeder af strukturen og dynamikken af individuelle, fritflyvende nanopartikler

og makromolekyler. På denne måde kan der laves "molekylære film", som for eksempel afslører, hvordan et lægemiddelmolekyle reagerer med proteiner i en menneskelig celle, eller hvordan planteproteiner lagrer lysenergi.



På grund af deres store størrelse og de enorme omkostninger ved at bygge og drive dem findes der kun få XFEL i verden. Den største er den europæiske XFEL, der ligger i det nordlige Tyskland kun 150 km fra den danske grænse. Den strækker sig en afstand på 3,4 km hele vejen fra Hamburg til forbundsstaten Slesvig-Holsten. Den er i stand til at generere op til en million intense og ultrakorte røntgen-lyspulser per sekund. I forsøgshallen i Schenefeld (venstre side) kan 5 eksperimenter udføres på samme tid ved hurtigt at skifte laserstrålen fra et eksperiment til et andet.

vedet er superflydende? Hvis den lille dråbe bestående af flydende helium er en supervæske, så vil der dannes kvantehvirvelstrømme inde i den, hvis man får den til at rotere – ligesom i eksperimentet med beholderen. Derfor satte forskere sig for at lede efter kvantehvirvelstrømme i helium-nanodråber.

Dråberne er imidlertid meget skrøbelige og fuldstændigt gennemsigtige objekter, der ikke kan undersøges ved hjælp af mekaniske eller spektroskopiske metoder, som man normalt finder i et fysiklaboratorium.

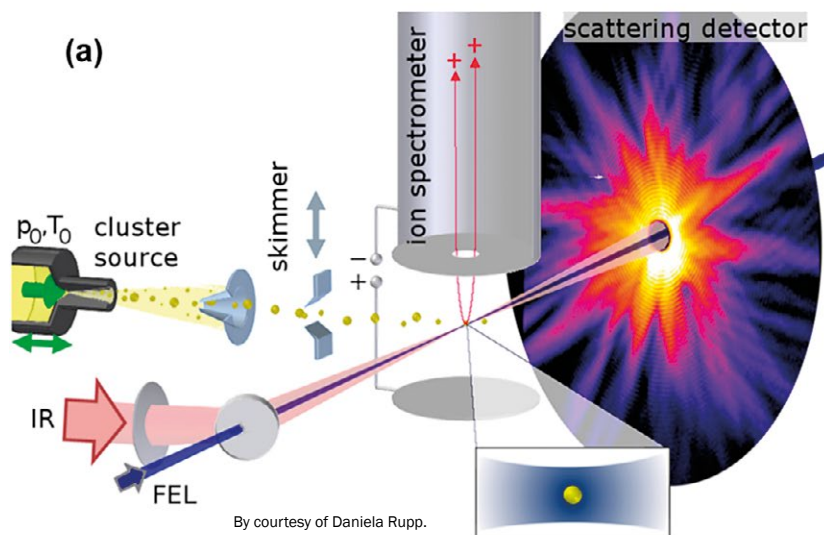
Der var således behov for nye måder til direkte at undersøge

fasen og strukturen af helium-nanodråber. Den nylige udvikling af røntgen-frielektronlasere (XFEL) har gjort det muligt at afbillede formerne og den indre struktur af små objekter som helium-nanodråber direkte. XFEL er en ny slags laser, der er i stand til at generere ekstremt intense, ultrakorte lyspulser i det ekstreme-ultraviolette- (XUV) og røntgenområdet af det elektromagnetiske spektrum.

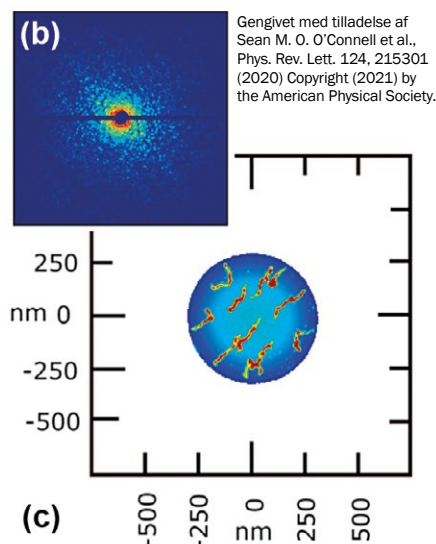
Ved hjælp af en XFEL – LCLS i Stanford, USA – var Andrey Vilesov og kolleger i 2014 de første til direkte at afbillede strukturen af helium-nanodråber og kvantehvirvlerne inde i dem. Tilstedeværelsen af kvan-

tehvirvler i heliumdråberne var et endegyldigt bevis på, at dråberne er superflydende.

Ud over deres evne til at producere billeder af isolerede molekyler og nanopartikler er XFEL yderst nyttige værktøjer til at studere fotokemiske processer med en meget høj tidsopløsning ( $<1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ). På denne måde kan man observere de hurtigste processer, der finder sted inde i molekyler, nemlig bevægelsen af de enkelte atomer, som molekylet består af. Det gør det muligt at følge, hvordan molekyler vibrerer eller falder fra hinanden og endda også bevægelsen af elektroner, når en kemisk binding dannes eller brydes.



By courtesy of Daniela Rupp.



Gengivet med tilladelse af Sean M. O. O'Connell et al., Phys. Rev. Lett. 124, 215301 (2020) Copyright (2021) by the American Physical Society.

### Billeddannelse af enkelte nanodråber med røntgenpulser:

(a) Skematisk illustration af den eksperimentelle opsætning, der anvendes til optagelse af røntgenbilleder af individuelle partikler ved belysning med XFEL-lyspulser. Ud af en dyse (venstre side) genereres en stråle af atomare eller molekylære klynger eller nanodråber (gule kugler), der passerer gennem røntgenstrålens fokus (blå diagonal stribe). De billeder, som bliver optaget af nanodråberne/klyngerne på et røntgenkamera (sort oval på højre side), er røntgendiffraktions-

billeder, hvorfra det reelle billede af dråben kan rekonstrueres. Ud over diffraktionsbilleder detekteres ioner fra de ioniserede klynger ved hjælp af et ionspektrometer (gråt område i midten).

(b) Typisk diffraktionsbillede optaget for en helium-nanodråbe indeholdende et par xenonatomer som kontrastmiddel.

(c) Rekonstrueret billede fra et diffraktionsbillede, som viser, hvordan heliumdråben ser ud samt dannelsen af kvantehvirvler i dråben.

I såkaldte pumpe-probe-målinger initierer en første laserpuls (pumpe) en reaktion ved for eksempel at excitere et molekyle, og en anden laserpuls (probe) undersøger reaktionen i molekylet efter excitationen ved yderligere at excitere eller ionisere det. Gentagelse af denne sekvens med forskellige forsinkelser mellem pumpe- og probelaserpulsen visualiserer derefter systemets tidsudvikling på samme måde som et stroboskop.

### Nanolaboratorier til spektroskopi og kold kemi

I dag bruger de fleste forskere som nævnt helium-nanodråber som små "reagensglas" til at studere fremmede molekyler eller nanopartikler indlejret i dem. De indlejrede molekylers rotation og vibration er næsten uforstyrret, som om molekylerne bevæger sig i frit rum, mens den lave temperatur, som molekylerne afkøles til, gør det meget lettere at forstå deres spektre. Desuden bruges helium-nanodråber som nanolaboratorier til at undersøge kolde kemiske reaktioner af atomer og molekyler indlejret i dem. På en måde genskaber helium-nanodråberne de forhold, der hersker i den

øvre atmosfære og i det ydre rum, hvor kemien påvirker vores klima og udviklingen af stjerner og planeter.

Helium-nanodråber kan endda hjælpe med at nå det store mål med røntgen-frielektronlasere om at visualisere strukturen af biologisk relevante molekyler med atomar opløsning ved røntgenstråling-billeddannelse.

Henrik Stapelfeldt og hans gruppe ved Institut for Kemi på Aarhus Universitet har for nylig vist, at molekyler, når de er indlejret i en helium-nanodråbe, kan orienteres i rummet i en bestemt retning ved hjælp af skræddersyede laserpulser. Molekylet bevarer sin orientering i nogen tid efter, at pulsen er passeret, så man med røntgen-laserpulsen kan nå at tage et billede af molekylet. Dette er en stor fordel, da molekyler normalvis peger i alle retninger, når de er fritflyvende. Derfor skal der tages et stort antal røntgenbilleder gentagne gange for at afsløre den faktiske struktur af molekylet. Ved at retningsbestemme molekylet i en helium-nanodråbe vil man kunne forstå molekylets struktur ud fra færre billeder, hvilket

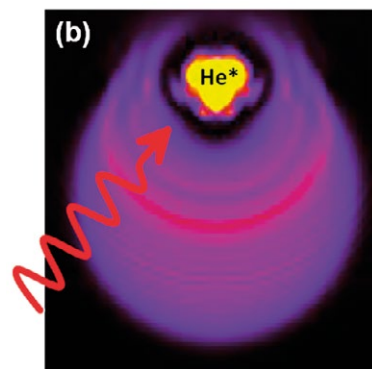
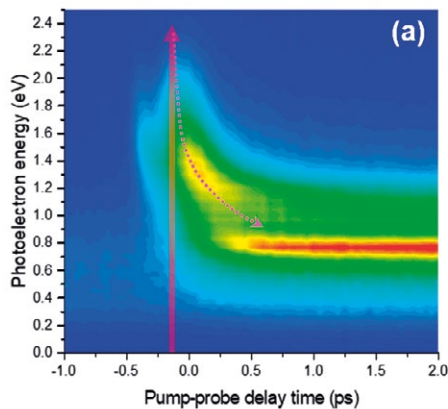
vil gøre eksperimentet markant nemmere. Når et molekyle er indkapslet i en heliumdråbe, kan heliumskallen desuden fungere som en dæmper, der forhindrer den hurtige eksplosion af molekylet, når det først er ramt af røntgenpulsen. På denne måde forlænges eksponeringstiden effektivt, og billedkvaliteten øges. Derudover kan røntgenfotoner, der afbøjes af heliumskallen, hjælpe med at få mere information om den tredimensionelle struktur af molekylet, og altså ikke kun dem, der afbøjes på det faktiske molekyle i heliumdråben. Et lignende trick bruges i holografi, som gør det muligt at lave tredimensionelle billeder af objekter.

### Nanobobler

Helium er det mest inerte kemiske stof, man finder i naturen, og det er fuldstændigt gennemsigtigt for infrarødt og synligt lys. Strålingen, som dannes af en XFEL, har dog nok energi til at excitere eller ionisere helium-atomerne i dråben, hvilket betyder, at dråben ikke længere er gennemsigtig.

I vores forskning studerer vi mekanismerne i helium-nanodråberne samt de indlejrede atomer og

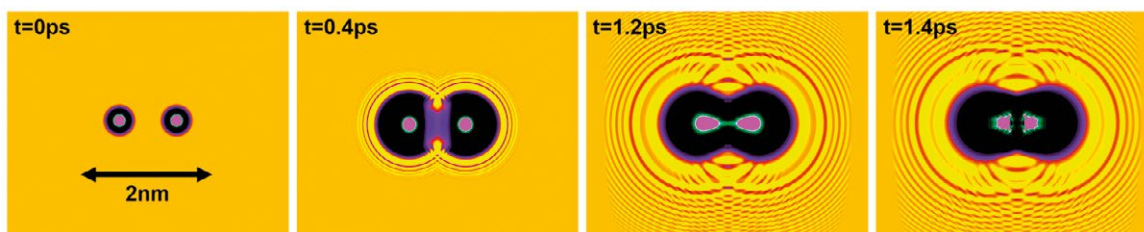




Publiceret i Nat Commun 11, 112 (2020) under en CC BY 4.0 licens.

### Tidsopløst elektronspektroskopi af helium-nanodråber:

(a) Resultatet af et nyligt eksperiment på helium-nanodråber ved brug af en frielektronlaser. Figuren viser fordelingen af elektronenergi til forskellige forsinkelser mellem en exciterende XUV-puls og en ioniserende UV-puls (Rød betyder høj intensitet og blå lav intensitet). Den røde pil indikerer den elektronenergi, der kunne forventes, hvis dråben blev ioniseret direkte af UV-pulsen. Den stiplede pil illustrerer afgivelsen af energi fra den exciterede dråbe. (b) Snapshot af heliumdensiteten i dråben 4 picosekunder efter excitation opnået fra computersimulering.



Publ. i Phys. Rev. X 11, 021011 (2021) under en CC BY 4.0 licens.

Computersimuleringer af tidsudviklingen af to exciterede heliumatomer i superflydende helium. Det sorte område omkring de exciterede atomer (lyserøde cirkler) viser de hule bobler. Efterhånden som tiden går, ekspanderer disse bobler og smelter til sidst sammen og skubber dermed atomerne mod hinanden.

molekyler, efter at dråben er blevet exciteret eller ioniseret. Vi søgte blandt andet svaret på, om heliumnanodråberne fortsat kan bruges som inert reagentglas under forhold, hvor det indsendte lys har nok energi til at interagere direkte med dråben. Svaret er "nej" og så alligevel "ja".

Kort fortalt bliver helium-dråben meget reaktiv, når den exciteres, så den er på ingen måde inert i forhold til de indlejrede partikler. Men efter utrolig kort tid vil dråben skille sig af med den ekstra energi. Vi fandt ud af dette ved at bestråle dråberne med energiske pumpe- og probe-lyspulser ved frielektronlaseren FERMI i Trieste i Italien. Resultat var, at når der sker en excitation af nanodråben med en XUV-laserpuls, falder tingene lynhurtigt (efter mindre end et picosekund) igen på plads via en retrinsproces:

Først lokaliseres den elektroniske excitation på et atom i dråben og

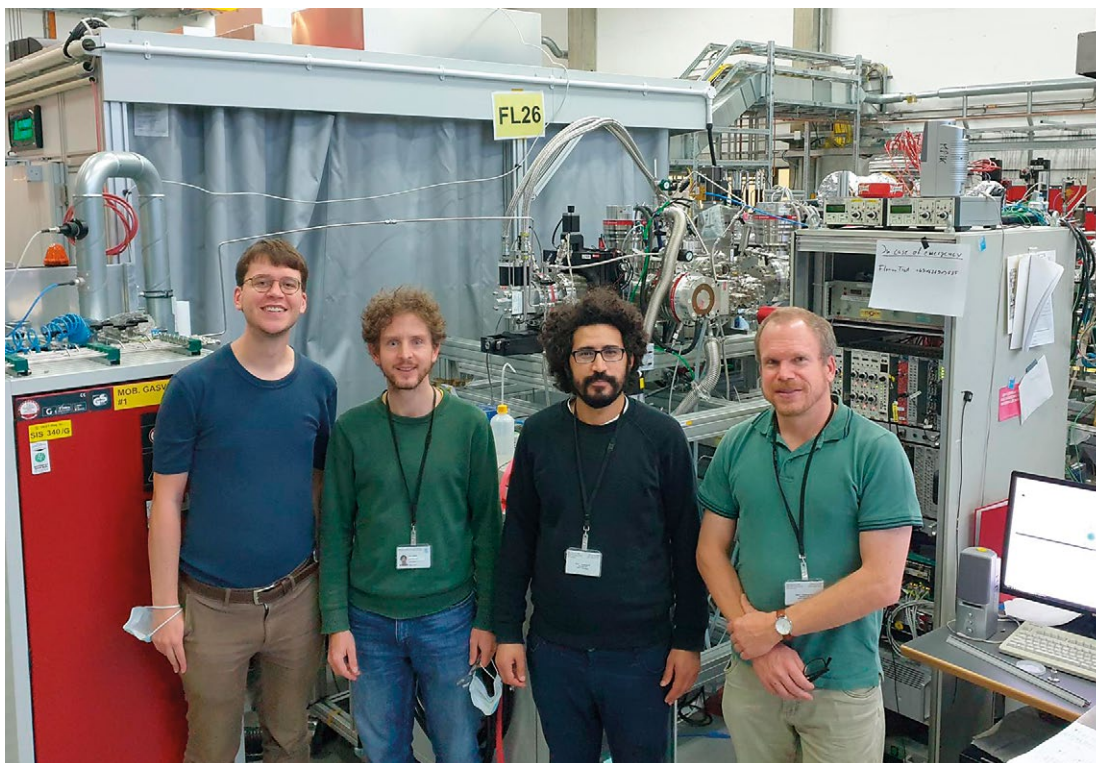
henfalder til den laveste exciterede tilstand. Derefter dannes en nanometer-stor boble omkring det exciterede atom. Til sidst søger boblen imod dråbens overflade, hvor den springer og afgiver den tilførte energi i form af et enkelt exciteret heliumatom. Herefter er alt ved det gamle i selve nanodråben.

Dette system bliver endnu mere komplekst, når to eller flere atomer exciteres i samme dråbe. Dette kan let gøres ved en XFEL ved at skruer op for lyspulsintensiteten. Hvad vi observerede i eksperimenterne og i ledsagende modelberegninger er, at der for et par exciterede atomer dannes en boble omkring hvert af atomerne. Boblerne smelter herefter sammen, hvormed atomerne skubbes mod hinanden. Exciterede atomer, som kommer tæt på hinanden, kan udveksle deres energi og på denne måde henfalde til et atom i grundtilstanden og et ioniseret atom og en elektron, der begge udsendes.

Denne type reaktion, som er en vigtig proces, når stof vekselvirker med energisk stråling, kaldes Interatomic Coulombic decay. Forståelse af denne form for henfaldsproces, især i forbindelse med bobledannelsen og et simpelt system som heliumdråber, kan hjælpe til forståelse af energi- og ladningsudveksling i for eksempel proteiner i biologiske systemer eller udvikling af urenheder i metaller i smeltet tilstand.

### Nanoplasmaer

Når flere end to atomer er exciteret, eller hele dråben ioniseres med en stærk laserpuls, transformeres dråben til en lille eksploderende kugle, som vi kalder for et nanoplasma. Plasma omtales ofte som den 4. tilstandsform sammen med fast, flydende og gas, fordi den har specifikke egenskaber, som stoffer i de tre andre tilstandsformer ikke har. For eksempel udsender en sådan laseropvarmet nanoplasma stærkt ladede ioner, hurtige elektroner og



De fire forskere foran det eksperimentelle apparat "ReMi" ved FEL FLASH2 på DESY i Hamborg. Foto: Akgash Sundalaringam.

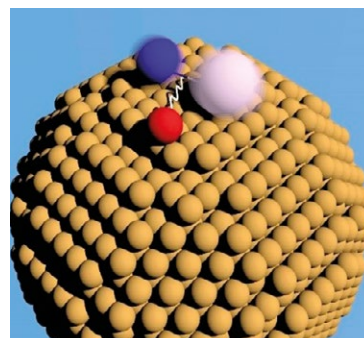
XUV-fotoner. Sidstnævnte egenskab anvendes i halvlederindustrien, hvor højtintegrerede mikrochips produceres ved hjælp af en teknik kaldet XUV-fotolitografi.

Helium-nanodråber, især når de er dopet med andre stoffer såsom xenonatomer, er særligt velegnede til at studere de grundlæggende processer, der foregår i et nanoplasma. Med denne viden vil vi muligvis bedre kunne kontrollere nanoplasma-tilstanden og på denne måde opnå mere intens XUV-emission ved specifikke bølglængder eller bruge nanoplasma som miniaturepartikelacceleratorer, der en dag måske kan erstatte de enorme konstruktioner, der anvendes i dag til forskning om elementarpartikler og til kræftbehandling.

### Sjælden proces kan være almindelig

Når en helium-nanodråbe exciteres af en XUV-laserpuls, bliver den som tidligere beskrevet til et meget reaktivt miljø, som kan bruges til at studere fundamentale reaktionsmekanismer. På samme måde som et par exciterede heliumatomer kan reagere med hinanden, kan andre ato-

mer og molekyler, der er bundet til nanodråben, også reagere med det exciterede helium. På den måde kan atomer og molekyler undersøges ved at excitere det heliummiljø, som de sidder i. Mens det fremmede molekyle i det enkleste tilfælde netop er ioniseret på grund af overførsel af energi fra det exciterede helium til molekylet, har vi for nylig vist en anden, ganske eksotisk proces: Dobbel-ionisering af molekyler dannet af metalatomer ved energioverførsel fra exciteret helium. Dobbelionisering er en helt speciel proces, hvor to elektroner samtidigt bliver udsendt fra et atom eller et molekyle. Typisk er det en sjælden proces sammenlignet med enkeltionisering, hvor kun en enkelt elektron udsendes. Det skyldes, at dobbelionisering kræver, at to elektroner rammes samtidigt af en energirig foton eller en partikel. Vi har vist, at dobbelionisering ikke nødvendigvis behøver at være en sjældenhed – faktisk kan det i visse situationer være den dominerende proces. Tricket kaldes double Interatomic Coulombic decay, som er en proces, hvor den overskydende energi fra en exciteret partikel bruges til at dobbelionisere en nabopartikel.



By courtesy of A. C. Laforge.

Illustration af dobbelionisering af et metal molekyle (blå og hvide kugler) ved energioverførsel fra et exciteret heliumatom (rød kugle) på overfladen af en helium-nanodråbe.

Dette eksperiment blev udført ved hjælp af en synkrotronstrålingskilde i Italien, der fungerer efter næsten det samme princip som en XFEL. Synkrotroner er normalt store faciliteter, der drives og bruges af store internationale teams af forskere og teknikere. Der findes dog en lille udgave af en synkrotron kaldet ASTRID2 i kælderens på Aarhus Universitet. Her har vi for nyligt designet nyt måleudstyr, der giver os mulighed for at udføre mange flere eksperimenter på helium-nanodråber og andre typer nanopartikler ved hjælp af XUV-stråling. ■

### Videre læsning

J. Toennies and A. Vilesov, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2004, 43, 2622 – 2648. DOI: 10.1002/anie.200300611

L. Gomez et al., *Science* 345 (6199), 906-909. DOI: 10.1126/science.1252395

M. Mudrich et al., *Nat Commun* 11, 112 (2020). DOI: 10.1038/s41467-019-13681-6

A. C. Laforge et al., *Nature Physics* 15, 247 (2019). DOI: 10.1038/s41567-018-0376-5

A. C. Laforge et al., *Phys. Rev. X* 11, 021011 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevX.11.021011

Forfatterens forskning beskrevet i artiklen er muliggjort af finansiel støtte fra Aarhus Universitets Fond og fra Carlsbergfondet.

HENT INSPIRATION TIL

# GYMNASIELÆRERDAGE

PÅ AARHUS UNIVERSITET

---

Underviser du i naturvidenskab i gymnasieskolen?

Så kom med til gymnasielærer dage og få

- ✓ FAGLIGT NYT FRA FORSKNINGENS VERDEN
- ✓ IDÉER TIL NYE UNDERVISNINGSEMNER
- ✓ MULIGHED FOR AT NETVÆRKE MED ANDRE UNDERVISERE
- ✓ PRÆSENTATION AF AARHUS UNIVERSITETS TILBUD TIL GYMNASIER

Det er gratis at deltage, men du skal tilmelde dig på [au.dk/gym](https://au.dk/gym)

---

**FÆLLES  
GYMNASIELÆRERDAG  
PÅ NATURAL SCIENCES**

21. JANUAR 2022

Som noget nyt inviterer de naturvidenskabelige institutter på Aarhus Universitet til en fælles gymnasielærer dag for lærere i sciencefag.

**GYMNASIELÆRERDAG  
I TEKNOLOGI OG  
TEKNIK**

4. NOVEMBER 2021

Læs mere på  
og tilmeld dig på

**AU.DK/GYM**



AARHUS  
UNIVERSITET  
NATURAL SCIENCES  
TECHNICAL SCIENCES





## Undervisningsmaterialer

Find dem på [AktuelNaturvidenskab.dk](http://AktuelNaturvidenskab.dk)

### Undervisningsmateriale om aldring og sundhed

På Aktuel Naturvidenskab's hjemmeside kan du finde et nyt arbejdsark, der knytter an til artiklen *Det skal du gøre for at leve sundt og længe* med Bente Klarlund, som blev bragt i Aktuel Naturvidenskab nr. 4/2021. Arbejdsarket kan i udgangspunktet bruges af alle på Bioteknologi i gymnasiet.

Derudover er der et arbejdsark om *Forskning i aldring og sundhed*, som består af arbejdsopgaver, der har fokus på methodediskussion og er målrettet Biologi A og Bioteknologi A. Arbejdsarket vil generelt kunne bruges i forbindelse med alle emner i fagenes læreplaner.

### Arbejdsark om Universets vokseværk

Til artiklen *Universet har vokseværk* fra nr. 2/2021 er der udarbejdet et nyt arbejdsark, der kan bruges sammen med artiklen. Målgruppen

er Fysik C eller B, astronomi C. Forudsætninger: Kendskab til rødforskydning, Hubbles lov og universets udvidelse. Varighed: 1 modul.

Undervisningsmateriale er lavet som led i projektet *Brobygning på første række*, der er et samarbejde mellem Aktuel Naturvidenskab og foredragsrækken Offentlige foredrag i Naturvidenskab. Projektet er finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Kommende foredrag i Offentlige foredrag i Naturvidenskab ([ofn.au.dk](http://ofn.au.dk)):

**26/10:** *Pandemier de seneste 200 år* med Lone Simonsen

**8/11:** *Den inderste kerne* med Lotte Kaae Andersen og David Lundbek Egholm

**18/11:** *Vores cellers saltbalance* med Hanne Poulsen

### Nye quizzer

Prøv den nye quiz om planetbaner, der knytter an til artiklen *Uventede planetbaner kan afsløre stjernesystemers historie* – se side 8.

## ABONNEMENTS-SERVICE

Har du fået ny adresse eller ønsker du at bestille et abonnement på bladet?

Kontakt os på telefon: 87 15 20 94  
E-mail: [abo@aktuelnaturvidenskab.dk](mailto:abo@aktuelnaturvidenskab.dk)

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk)

Husk at melde flytning til ny adresse. Vi modtager desværre ikke automatisk besked om din nye adresse.

### Til nye abonnenter:

Bestil en intro-pakke med otte helt nye numre plus abonnement i et år (6 numre) for kun 354,- kr. inkl. porto & ekspedition.

## OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

### Styregruppe

- **Birgitte Lyhne Broksø**, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- **Jane Thoning Callesen**, communication manager, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Torben Jarl Jørgensen**, kommunikationskonsulent, Roskilde Universitet
- **Mikkel Linnemann Johansson**, teamleder, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Sanne Holm Nielsen**, kommunikationsmedarbejder, Aalborg Universitet
- **David Lundbek Egholm**, prodekan ved Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet

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

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

ISSN: 1399-2309 (papirudgaven), 1602-3544 (web)

Oplag: 5.800



### Redaktionsgruppe

- **Sune Holst**, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Birgitte Svennevig**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Carsten Rabæk Kjaer**, Aktuel Naturvidenskab
- **Jørgen Dahlgaard**, Aktuel Naturvidenskab
- **Katherina Killander**, Københavns Universitet
- **Sanne Holm Nielsen**, Aalborg Universitet
- **Signe Hansen**, Viborg Gymnasium og HF
- **Torben Jarl Jørgensen**, Roskilde Universitet

### Redaktionen:

Tlf.: 87 15 20 94

E-mail: [red@aktuelnaturvidenskab.dk](mailto:red@aktuelnaturvidenskab.dk)

Hjemmeside: [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk)

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

Omslagsfoto: En kunstnerisk gengivelse af exoplaneten Kepler-35, en planet på størrelse med Saturn, der kredser om et par af stjerner.

Illustration: Lynette Cook / [extrasolar.spaceart.org](http://extrasolar.spaceart.org).

Al henvendelse til:  
Aktuel Naturvidenskab,  
Ny Munkegade 120, 8000 Aarhus C  
E: [abo@aktuelnaturvidenskab.dk](mailto:abo@aktuelnaturvidenskab.dk)  
T: 87152094

# Hot forskning

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Siden sidste bagside er der uddelt Nobelpriser, og den opmærksomme læser, har måske bidt mærke i, at chili spiller en ikke uvæsentlig rolle for en af priserne. Ja, det er nu ikke chilifrugten i sig selv, der har været i fokus i den forskning, der i år har udløst en nobelpris i Fysiologi eller medicin. Mere præcist er det det molekyle, der gør chilier stærk, nemlig capsaicin.

Med sin forskning har den ene af årets nobelpristagere, David Julius, afsløret den fysiologiske mekanisme, som sørger for at der genereres et signal til hjernen, når en nervecelle kommer i kontakt med capsaicin. Den afgørende faktor i den mekanisme er et protein – en ionkanal – i cellemembranen med det kække navn TRPV-1. Dette protein viste sig at være det selvsamme som aktiveres, når vi udsættes for smerteudløsende varme, og hermed havde Julius og kolleger afsløret vores organismes varmesensorer. Forskningen har siden afklaret, at der findes en hel serie af varmemfølsomme TRPV-proteiner, der reagerer på forskellige temperaturintervaller. Og i den anden ende af temperaturspektret er der tilsvarende en hel serie TRMP-proteiner, der er kuldefølsomme og som kan stimuleres af kemiske stoffer som menthol eller pebermynte, der giver en falsk kuldefornemmelse.

## Ikke noget specielt ved capsaicin

Når sagen nu i et eller andet omfang handler om chili og capsaicin skynder jeg mig at kontakte Ole G. Mouritsen, som er professor ved Institut for Fødevarevidenskab på Københavns Universitet, for at få et perspektiv på historien. Han har nemlig tidligere skrevet en længere artikel i Aktuel Naturvidenskab om styrken af chili og interesserer sig i det hele taget for de fysiologiske mekanismer bag smagsoplevelser.

Han fortæller til en start, at det på ingen måde er tilfældigt, at Julius og kolleger brugte netop capsaicin i deres forskning, selvom der sådan set ikke er noget unikt ved dette stof.



Foto: Shutterstock

»Man kunne lige så godt have brugt piperin, som er det aktive stof i sort peber, der giver en brændende smag, til at lave de samme undersøgelser«, siger han. »Men capsaicin har i mange år – også før David Julius i slutningen af 1990'erne foretog sine undersøgelser – fungeret som et modelsystem for, hvordan et kemisk stof kan udløse reaktioner i vores organisme svarende til smertepåvirkning. Så man kan sige, at capsaicin er en del af forsknings-traditionen indenfor feltet.«

## Når cellemembranen spiller med

Det med forskningstraditioner bringer hurtigt Ole G. Mouritsen videre til et aspekt af capsaicins virkningsmekanisme, som han finder særlig interessant. Nemlig, at forskning har vist, at capsaicin tilsyneladende også mere generelt påvirker cellemembranen, som TRPV-1-proteinet sidder i.

»Den klassiske forståelse af, hvordan ion-

kanaler som TRPV-proteinerne virker, er, at de aktiveres ved, at et specifikt stof binder sig til dem. Men hvis det er den eneste virkemåde, er det svært at forstå, hvordan et stof kan have en virkning – for eksempel som bedøvelsesmiddel – selvom der ikke findes receptorer for det i cellemembranen«, siger han.

Hvordan man forklarer det, afhænger af, hvilken "skole" man tilhører, fortæller Ole G. Mouritsen. Men den forklaring, han selv har mest fidus til, er, at stof også kan udøve en virkning på ionkanaler gennem en ændring af cellemembranens egenskaber.

»At membraner kan indgå aktivt i en virkningsmekanisme illustreres i virkeligheden af den anden nobelpristager Ardem Patapoutian's opdagelse af receptorer for følelse. For de aktiveres netop af mekaniske ændringer i cellemembranen«, slutter han. ■