

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI  
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL  
*natur* VIDENSKAB

H.C. Ørstedjubilæum 2020

**DEN GRØNNE OMSTILLING  
OG EL-NETTET  
DA SAMFUNDET BLEV  
ELEKTRIFICERET**

Cellernes kommandocentraler  
Visualisering af Danmarks kulturarv

NR.5 - 2020 NOVEMBER: 50 KR

## Hæder til pandekagehop

I redaktørernes tilbageblik på de 15 års udgivelse af tidsskriftet *Nature Physics* fremhæves blandt andet en artikel af Tina Hecksher fra Roskilde Universitet. Hun havde sammen med en gruppe studerende ladet sig inspirere af fænomenet "pandekagehop", hvor små dråber vand kastes tilbage i en flad, skivellignende form, når de rammer en særlig type overflade. I artiklen undersøgte de fænomenet på makroskalaen med en vandfyldt ballon og en sømmåtte og viste, at vandballonen opfører sig nøjagtig som dråben! *Nature Physics*, vol 16, pp 999–1005.



## Quiz

Hvilket brud med den traditionelle forståelse af proteiner fulgte blandt andet af kortlægningen af det menneskelige genom i år 2000?

- At proteiner alligevel ikke er opbygget af aminosyrer.
- At mange proteiner er yderst funktionelle, selvom de ikke folder i en specifik, tredimensionel struktur.
- At koden til dannelsen af proteiner slet ikke ligger gemt i genomet.

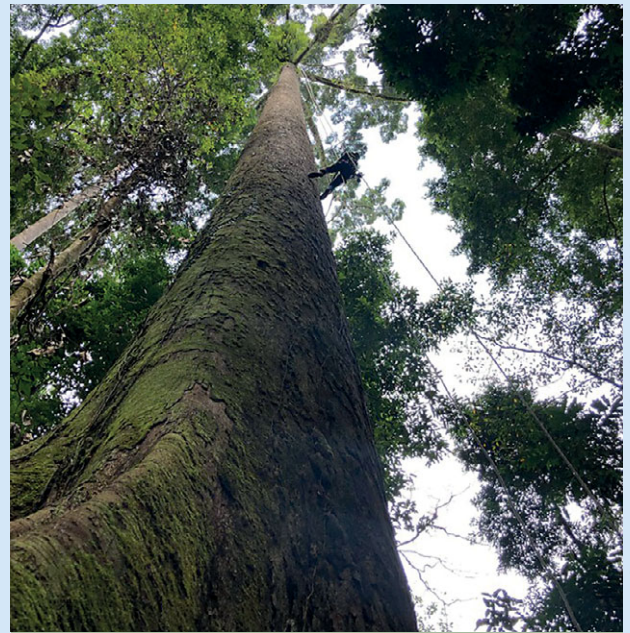
Find svaret i artiklen: *Forskere kortlægger cellernes kommando-centraler* i dette nummer.

## Matematiker får Guldmedalje



Den 81-årige matematiker Gerd Grubb blev den 21. oktober hædret med Videnskabernes Selskabs Guldmedalje, som blev overrakt af HM Dronningen. Guldmedaljen uddeles for en livslang indsats for dansk videnskab, og Gerd Grubb har været et videnskabeligt fyrtårn indenfor den matematiske forskning både herhjemme og internationalt.

Foto: Jim Høyer, KU



EN forsker bestiger det 100,8 meter høje træ kaldet Menara – Borneos højeste.

Foto: A. Shenkin et al./Front. For. Glob. Change (CC BY 4.0)

## Fri for fiskestank

Lugten af rådnende fisk vil for de fleste mennesker til at rynke voldsomt på næsen af afsky. Men for personer med en bestemt mutation i et gen, der koder for en specifik duftreceptor i næsehulen, kan selv rådden fisk lugte af karamel, viser et nyt islandsk studium. Forsøgspersoner med mutationen fandt generelt den intense fiske-lugt mindre ubehagelig end personer uden, og de havde en tendens til at kategorisere lugten som ikke havende noget med fisk at gøre – såsom kartofler, karamel eller roser. Nogle kunne endda overhovedet ikke mærke fiskelugten.

Curr. Biol., <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.09.012>

## Vind begrænser tropiske træers højde

Hvorfor finder man de højeste tropiske træer på Borneo? Fordi de relativt milde vinde på øen tillader træerne at blive højere end andre steder, viser ny forskning. I tempererede egne kan træer bliver endnu højere (eksempelvis Rødtræ, *Sequoia sempervirens*), men her er væksten ifølge forskerne begrænset af andre forhold, idet disse træer har meget tykkere stammer.

Kilde: *Biotropica*, <https://doi.org/10.1111/btp.12850>

## Ørsted – nu med øl

I anledning af Ørstedjubilæet i år har Carlsberg lanceret en Ørsted-øl for at hyldes Ørsted, som inspirerede Carlsbergs grundlægger J.C. Jacobsen til at brygge øl på et videnskabeligt grundlag. Øllen kan nydes på udvalgte barer og restauranter i Danmark, og den serveres den 10. november på alle de 150 steder i landet, der livestreamer foredraget om ølbrygning i serien Offentlige foredrag i Naturvidenskab (se ofn.au.dk).



## Nobelpris til opdagere af hepatitis C

Nobelprisen i medicin går i år til forskerne Harvey J. Alter, Michael Houghton og Charles M. Rice, hvis forskning ledte til identifikationen af hepatitis C, en virus som giver smitsom leverbetændelse. Det har været afgørende for, at sygdommen – som årligt dræber op imod en halv million mennesker på verdensplan – i dag kan kureres, hvis den opdages i tide.

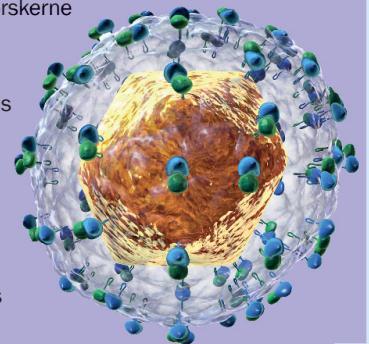
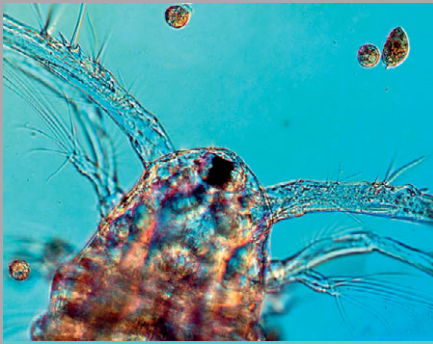


Illustration af Hepatitis C virus. CC BY-SA 4.0

# indhold



Et evolutionært våbenkapløb mellem planktonalger og deres prædatorer har givet anledning til udviklingen af forsvarsmekanismer hos algerne og måder at omgå forsvaret hos deres prædatorer. Dette kapløb er kilde til stor biologisk mangfoldighed og bestemmende for nogle af havets vigtigste funktioner.

8



Visualisering som metode til at afsløre mønstre i store mængder data er et stærkt redskab til at bygge bro mellem datalogi og andre forskningsområder. Værdien af visuelt design bliver demonstreret med et eksempel bygget på Dansk biografisk leksikon.

18



I cellerne jonglerer molekyllære kommandocentraler rundt med tusindvis af signalmolekyler for at holde cellerne kørende som vel-smurte maskiner. Danske forskere har afkodet, hvordan cellens kommandocentraler virker, og hvordan en særlig type dansende proteiner spiller en central rolle i al cellulær kommunikation.

12



Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen var en afgørende forudsætning for, at man har kunnet udvikle det el-net, vi alle tager for givet i dag. Men det har langt fra været en lineær proces. Det viser et nærmere studium af de første skridt på vejen.

24

## FORSKNING OG NYHEDER

- 2 Noter
- 4 Kort nyt
- 8 Et vandigt våbenkapløb
- 11 Cannabis mod MRSA
- 12 Forskere afslører cellernes kommandocentraler
- 18 Visualisering af Danmarks kulturarv
- 24 Da samfundet blev elektrificeret
- 28 Den Grønne Omstilling og el-nettet

## PERSPEKTIV

- 33 Notation og repræsentationers betydning for matematik
- 38 Videnskabelig logik
- 40 SERVICE og Bøger
- 44 BAGSIDEN:  
Varm tid med kolde krystaller

## 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

Søren Rud Keiding, direktør for AIAS (Aarhus Institute of Advanced Studies), 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 NATUR- OG BIOVIDENSKABELIGE FAKULTET



DET NATURVIDENSKABELIGE  
FAKULTET



DET TEKNISKE  
FAKULTET



Roskilde Universitet

SPONSOR-  
ABONNENTER



# Beton optager store mængder CO<sub>2</sub>

**B**eton er verdens mest populære byggemateriale. Beton, som består af sand, sten, vand og cement, er billigt og let at arbejde med. Men hvad beton ikke koster på pengepungen, koster det til gengæld på CO<sub>2</sub>-kontoen: Produktion af cement er den industri, som udleder mest CO<sub>2</sub>.

Men nu viser ny forskning, at beton, ligesom træerne, optager store mængder CO<sub>2</sub>.

For første gang har et hold forskere kortlagt det globale CO<sub>2</sub>-regnskab over cements samlede livscyklus – fra cementen bliver født i store ovne ved 1500 grader, hvorefter det blandes med sand, sten og vand for at blive til store betonbyggerier, mens det til allersidst knuses og eventuelt genanvendes i vores veje. Det interessante er, at forskerne i cementens samlede CO<sub>2</sub>-regnskab også tager højde for, at betonen i sin levetid absorberer en stor del CO<sub>2</sub>. Effekten kalder forskerne for svampeeffekten, fordi beton ligesom en svamp opsuger CO<sub>2</sub>.



Bropiller er ofte udført i beton. Foto: Colourbox

»Cirka 30 procent af de samlede CO<sub>2</sub>-emissioner fra cementproduktionen bliver optaget af betonkonstruktioner, og vores beregninger viser, at den globale fremtidige absorbering af CO<sub>2</sub> vil være betydelig, siger professor Gang Liu fra Institut for Grøn Teknologi på Syddansk Universitet og peger på, at det især er bygninger og store vejkonstruktioner som tunneler og broer, der suger langt det meste CO<sub>2</sub>.

Svampeeffekten er et resultat af en langsom proces kaldet karbonatisering, der sker, når kalken i cementen gennem årene reagerer med CO<sub>2</sub> fra luften.

»For at foretage en retvisende fremskrivning, som tager højde for cementens tveæggede CO<sub>2</sub>-effekt – ved på den ene side at udlede CO<sub>2</sub> i produktionen for derefter at opsuge CO<sub>2</sub> over tid – er det nødvendigt at forudsige cementefterspørgslen og have et overblik over den samlede mængde af betonkonstruktioner,« påpeger Gang Liu.

Han understreger, at selv om svampeeffekten bliver indregnet i cementindustriens samlede klimaregnskab, ændrer det ikke på, at der er behov for radikale teknologiske fremskridt som opsamling og lagring af CO<sub>2</sub>, før industrien kan aflevere et CO<sub>2</sub>-regnskab, der går i nul.

Birgitte Dalgaard, SDU. *Nature Communications*, doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w

## Godt nyt for brintbilen

**B**rintbiler er i dag et sjældent syn. Det skyldes blandt andet, at brintbiler er afhængige af ret meget platin som katalysator i brændselscellerne – omkring 50 gram – hvor almindelige biler kun har brug for cirka fem gram. Platin er et kostbart materiale, der kun udvindes cirka 100 ton af om året i Sydafrikanske miner.

Men nu har forskere på Kemisk Institut ved Københavns Universitet udviklet en helt ny katalysator, der ikke er afhængig af den store mængde platin.

»Vi har lavet en ny katalysator, som i laboratoriet kun har brug for en brøkdel af den mængde platin en standard brændselscelle til brintbiler behøver, dvs. vi nærmer os samme mængde platin, som almindelige biler bruger. Samtidig er den nye katalysator langt mere stabil, end de katalysatorer, som sidder i brintbiler i dag,« siger professor Matthias



Afhængigheden af det sjældne overgangsmetal platin er en væsentlig hindring for udbredelsen af brintbiler. Foto: Chip Clark, Smithsonian Institution, cc-by-2.0

Arenz fra Kemisk Institut.

Bæredygtige teknologier har den udfordring, at de ofte er baseret på sjældne materialer, så det sætter en øvre grænse for skalerbarheden. Det kan den nye teknologi dog ændre på.

»Den nye katalysator kan gøre det muligt at

udrulle brintbiler i langt større skala, end man tidligere har kunnet,« siger Jan Rossmeis, professor og centerleder for Center for High Entropy Alloy Catalysis på Kemisk Institut. Den nye katalysator forbedrer markant brændselscellerne, så de leverer flere hestekræfter per gram platin, og det gør den langt mere bæredygtig at producere. Næste skridt for forskerne er at opskalere resultaterne, så teknologien kan implementeres i brintbiler.

»Vi er i dialog med bilindustrien om, hvordan det her gennembrud kan blive udrullet i praksis, så det ser lovende ud,« siger professor Matthias Arenz.

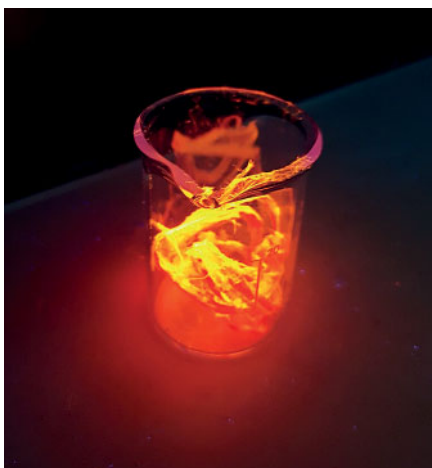
Resultaterne er netop publiceret i *Nature Materials* – et af de førende videnskabelige tidsskrifter for materialeforskning.

Katherina Killander, KU. *Nature Materials* <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0775-8>

# Fuldt blus på selvlysende stoffer

De fleste af os kender fluorescerende neonfarver fra overstrøgningsstusser og reflektsveste. Men fluorescerende stoffer anvendes også i stort omfang på hospitaler og i medicinsk og biologisk forskning. Ved at binde de fluorescerende stoffer til for eksempel DNA, antistoffer eller særlige områder i celler kan man eksempelvis måle kræftceller eller antistoffer i blodprøver fra patienter.

Jo kraftigere, lyssignalet fra farvestofferne er, jo mere nøjagtigt og hurtigt kan undersøgelserne udføres. Men stofferne holder op med at lyse, når de bliver for koncentrerede, og det har indtil nu sat en grænse for, hvor høje koncentrationer man kan bruge og dermed, hvor kraftigt et lyssignal man kan opnå. Men nu har forskere fra Kemisk Institut på Københavns Universitet og Indiana University i USA opfundet en løsning, som gør det muligt at mangedoble lyssignalet fra de fluorescerende stoffer:



En prøve med polystyren mærket med et fluorescerende farvestof og cyanostar (SMILES) under UV-lys.  
Foto: Bo Wegge Laursen.

»Vi har opfundet en måde at pakke fluorescensfarvestoffer meget tæt sammen i krystaller og nanopartikler, uden at de slukker, og det baner blandt andet vejen for mere

hurtige og præcise medicinske undersøgelser. For med et kraftigere lyssignal kan vi måle mindre mængder af de biologiske molekyler, som for eksempel afslører sygdomme, og på den måde kan det få betydning for patienter«, siger professor Bo Wegge Laursen fra Kemisk Institut.

Forskerne har gjort det ved at tilsætte et molekyle kaldet cyanostar. Molekylet er i stand til at binde sig til farvestofferne og sikrer, at ingen af farvestofferne rører hinanden. Opfindelsen bliver kaldt SMILES (Small-molecule ionic isolation lattices) og er patenteret af Københavns Universitet og Indiana University i fællesskab. Forskerne er nu i gang med at undersøge, hvordan disse materialer konkret kan bruges i praksis i forskellige teknologier. Resultaterne er publiceret i det videnskabelige tidsskrift *Chem*.

Katherina Killander, *KU. Chem Vol. 6, Iss. 8, pp 1978-1997*

# Vippende sort hul

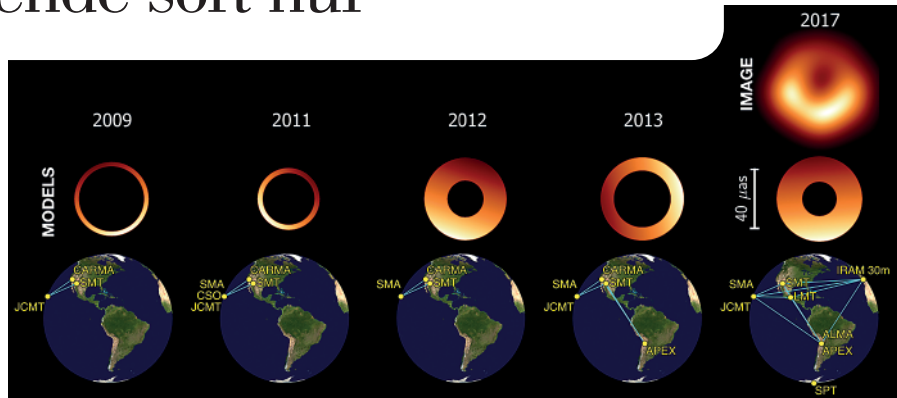
Hvis man vil vide, hvordan et sort hul opfører sig over tid, så er det godt, hvis man kan komme til at studere det over tid. Det har et internationalt forskerhold gjort, og de beretter nu, hvordan hullet med det catchy navn M87\* har opført sig over en 10-årig periode.

Det er det samme hul, som forskere fra Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration sidste år under stor pressebevågning præsenterede et billede af og dermed gav os verdens første billede af et sort hul.

»Det billede var baseret på en uges observationer og data. Nu har vi analyseret 10 års data og kan præsentere et helt andet billede og meget mere detaljeret viden om M87\*«, siger fysiker på Syddansk Universitet, Roman Gold, der har været med til at udvikle nogle af de modeller, der ligger til grund for arbejdet.

Der er flere interessante nyheder i den afhandling, som forskerne har udgivet om deres analyse i tidsskriftet *The Astrophysical Journal*:

»For det første kan vi se, at M87\* opfører sig på en måde, der er i overensstemmelse med vores teorier, og det er selvfølgelig tilfredsstillende



Illustrationen viser øverst en række snapshots af det sorte hul M87\* i perioden 2009-2017 og nedenfor den konstellation af teleskoper indenfor netværket EHT (Event Horizon Telescope), der blev anvendt. Det, man skal lægge mærke til, er, hvordan forskellige sider af ringen lyser op. Illustration: M. Wielgus, D. Pesce & the EHT Collaboration.

lende at få bekræftet. Dets silhuet har været konstant i de 10 år, det er blevet observeret og opfører sig i overensstemmelse med Einsteins generelle relativitets-teori for et sort hul af denne størrelse«, siger han.

Der er dog ikke stabilitet hele vejen rundt: Den ring, der omgiver det sorte hul, har overraskende vist sig at vippe – ret meget endda.

»Ikke alle teoretiske modeller er med på, at den skal vippe så meget, som vi har set. Så nu kan vi begynde at udelukke nogle af

modellerne for, hvordan gas falder i sorte huller«, siger Roman Gold. Grunden til, at ringen hele tiden vipper, er, at det sorte hul konstant suger gas til sig, som bliver varmet op til milliarder af grader, ioniserer og bliver turbulent ved mødet med magnetiske felter.

»Vi kan nu fortsætte med at observere dynamikken i gassen og studere, hvordan det sorte hul suger gassen til sig som næring«, siger Roman Gold.

Birgitte Svennevig, *SDU, The Astrophysical Journal, Volume 901:67*

# Græsprotein: klimavenligt alternativ til soja

**G**lobalt har landbruget et presserende behov for at reducere dets klima- og miljøpåvirkning. Der er flere veje mod det mål, men en af vejene er at fokusere på produktion af bæredygtige proteinkilder. I Europa og Danmark er der fokus på at øge egenproduktion af proteiner både af hensyn til forsyningsikkerheden, men også for at mindske sojaimporten fra især Sydamerika, hvor der sker omfattende skovrydning og anvendelse af problematiske kemikalier. Her er protein fra græs et attraktivt alternativ.

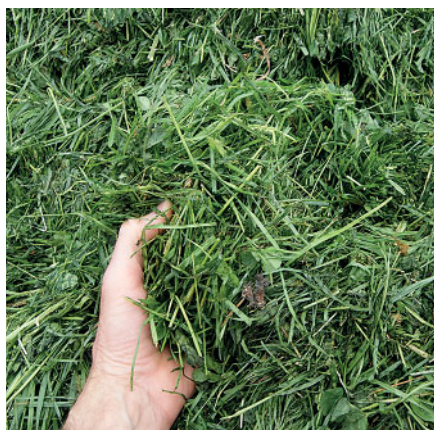


Foto: AAU

Grønne blade fra græs indeholder protein, der ved bioraffinering kan udvindes og anvendes i dyrefoder og menneskeføde. På Aalborg Universitet arbejder forskere på at udvikle metoder til at effektivisere grøn bioraffinering, der kan blive en vigtig løsning i fremtidens foder- og fødevarerproduktion, hvor branchen og forbrugere i stigende grad efterspørger bæredygtig, klimavenlig og plantebaseret mad.

Græsprotein – og generelt protein udvundet fra grønne blade – har nemlig en gunstig aminosyresammensætning med indhold af de essentielle aminosyrer på niveau med soja, som er blandt de bedste plantekilder, der findes. Bladproteiner har derfor en ernæringsprofil, der er mere optimal end andre plantekilder, for eksempel ærter, hamp og korn, og kan derfor blive en ny kilde til human ernæring.

Fotosyntetiske, aktive grønne blade indeholder rigelige mængder proteiner, hvoraf en stor del udgøres af RuBisCO, det vigtigste enzym involveret i fotosyntesen. Proteiner kan – udover at være essentielle næringsstoffer – også give funktionelle egenskaber i fødevarer som emulgering, gelering, stabilisering, fortykning og konservering. Græsprotein har ikke blot potentialet til at reducere klimabelastningen. Den danske industri for grøn bioraffinering har et stort eksportpotentiale. Det kræver dog, at der udvikles processer, der selektivt kan udvinde græsprotein, der egner sig til fødevarer og ikke kun til foder.

»Hidtil har sojaproteiner været den "gyldne standard" i fødevarerindustrien, og derfor er der et endnu uopfyldt behov for at forstå de forskellige funktionelle egenskaber af proteinerne fra græs for at kunne producere nye, bedre og mere klimavenlige fødevarer. Det er blandt andet det, vi forsker i på Aalborg Universitet,« siger lektor Mette Lübeck fra Institut for Kemi og Biovidenskab på Aalborg Universitet.

Sanne Holm Nielsen, Aalborg Universitet

## Kemipris til gensaks

**D**et har længe ligget i luften, at der måtte være en Nobelpris på vej til opdagere af genredigeringsværktøjet CRISPR/Cas9, som har været et yderst varmt forskningsemne de seneste år. I år skete det så, idet Nobelprisen i kemi går til franske Emmanuelle Charpentier og den amerikanske biokemiker Jennifer A. Doudna for deres udvikling af denne revolutionerende metode.



Emmanuelle Charpentier. Foto: Bianca Fioretti, CC BY-SA 4.0



Jennifer Doudna. Foto: Duncan Hall, CC BY-SA 4.0

I et epokegørende eksperiment lykkedes det dernæst de to forskere at reprogrammere gensaksen. I sin naturlige form genkender Crispr/Cas9 DNA fra virus, men Charpentier og Doudna viste, at gensaksen kan programmeres til at klippe ethvert DNA-molekyle på et prædefineret sted. Hvor DNA'et bliver klippet, er det let at "genskrive" den genetiske kode og dermed ændre på organismens egenskaber.

Manipulering af gener spiller en vigtig rolle i forskning og er for eksempel nødvendigt, når forskere skal afsløre funktionen af et specifikt gen i organismen og dermed for eksempel afsløre, hvilken rolle de spiller i sygdomme. Før udviklingen af gensaksen CRISPR/Cas9 var manipulering af gener en tidkrævende affære, men med udviklingen af denne metode, er forskerne nu i stand til med stor præcision af ændre den genetiske kode i løbet af få uger.

Som det ofte tilfældet i videnskabelig forskning var opdagelsen lidt af en tilfældighed.

I forbindelse med sine studier af bakterien *Streptococcus pyogenes* opdagde Emmanuelle Charpentiers et hidtil ukendt molekyle, tracrRNA. Molekylet viste sig at være en del af bakteriens ældgamle immunsystem, CRISPR/Cas, som kan uskadeliggøre virus ved at kløve deres DNA. Charpentier publicerede sine resultater i 2011 og indledte samme år et samarbejde med Jennifer Doudna, som var ekspert i RNA. Sammen lykkedes det dem at genskabe bakteriens gensaks i et reagensglas og samtidig forenkle de molekylære komponenter, så de var lettere at bruge.

Siden opdagelsen af gensaksen CRISPR/Cas9 i 2012 er anvendelsen af dette værktøj i forskningen eksploderet, og det har været afgørende for en lang række vigtige grundvidenskabelige opdagelser.

Og planteforskere har brugt metoden til at frembringe afgrøder, som er modstandsdygtige overfor skimmelsvamp, skadedyr og tørke. Indenfor den medicinske forskning er kliniske forsøg med nye kræftbehandlinger baseret på metoden på vej.

CRK, Kilde: [www.nobel.se](http://www.nobel.se)

# Sorte huller kaster Nobelpris af sig

**A**t naturen kan frembringe et objekt så kompakt, at intet – ikke en gang lys – kan undslippe dets tyngdekraft, er en af de fascinerende konsekvenser af Einsteins generelle relativitetsteori. Og mange vil nok opfatte disse sorte huller, som sådanne objekter kaldes, for et af universets mest eksotiske fænomener.

I dag tager vi det lidt som en selvfølge, at sorte huller faktisk findes – og sidste år lykkedes det oven i købet for forskere at tage et billede af et sort hul, eller rettere: En sky af glødende gas meget tæt på grænsen til det sorte hul, som kaldes begivenhedshorizonten. Men indtil midten af 1960'erne var sorte huller ingen selvfølge. Og Einstein selv troede faktisk ikke på, at disse objekter virkelig fandtes. Det matematiske bevis for, at eksistensen af sorte huller er en konsekvens af Einsteins generelle relativitetsteori kan vi takke den britiske fysiker og matematiker Roger Penrose for. I januar 1965 – ti år efter Einsteins død – publicerede Penrose en artikel, hvori han fremførte et sådant bevis. Han beskrev, at sorte huller i deres indre gemmer på en såkaldt singularitet, hvor tætheden bliver uendelig og alle kendte naturlove i praksis ophører. Hans banebrydende artikel



Roger Penrose



Andrea Ghez. Foto: UCLA

Reinhard Genzel

regnes stadig som det mest betydende bidrag til generel relativitetsteori siden Einstein. Og i år belønnes Penrose for dette vigtige bidrag til videnskaben med halvdelen af Nobelprisen i fysik.

Den anden halvdel går til henholdsvis den tyske astrofysiker Reinhard Genzel og den amerikanske astronom Andrea Ghez for deres opdagelse af, at der findes et supermassivt sort hul i centrum af vores galakse, Mælkevejen. Genzel og Ghez stod hver især i spidsen for en gruppe af astronomer, som siden de tidlige 1990'ere havde undersøgt en region kaldet Sagittarius A\* i centrum af Mælkevejen.

Banerne for de lysstærke stjerner tættest på centrum var blevet kortlagt med stadig større præcision. Og de to forskergruppers målinger viste det samme – nemlig at stjernerne kredsede med svimlende hastighed om et ekstremt tungt, men usynligt objekt. Et sort hul. Beregninger viste, at der var samlet en masse svarende til fire millioner gange vores Sol i et område, der i udstrækning ikke er meget større end vores Solsystem.

Sorte huller er den dag i dag stadig genstand for megen interesse fra forskerne, da der endnu er meget vi ikke ved om disse objekter. Billedet af et sort hul sidste år var således et resultat af et globalt netværk af teleskoper kaldet Event Horizon Telescope, som er dedikeret til forskning i sorte huller.

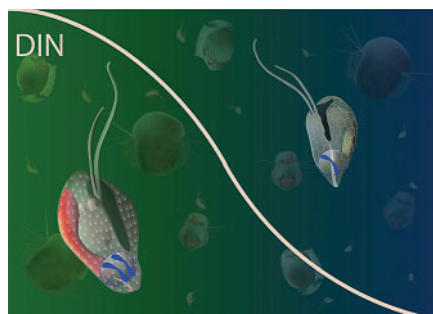
CRK, Kilde: [www.nobel.se](http://www.nobel.se)

# Alger overrasker forskerne

**T**o af de mere almindelige algearter, *Teleaulax amphioxeia* og *Plagioselmis prolonga*, på dansk kaldet rekylalger, er i virkeligheden en og samme art, der basalt set forandrer mængden af deres DNA afhængigt af ressourcer og årstid. Det viser et nyligt studie af forskere ved Aarhus Universitet og Københavns Universitet, som er publiceret i *Science Advances*.

Typisk formerer alger sig aseksuelt gennem celledeling. Og det var faktisk lidt af et tilfælde, at forskerne nu har opdaget, at visse arter af encellede alger kan variere deres DNA-mængde alt afhængigt af deres vækstbetingelser og det miljø, de befinder sig i.

Ph.d-studerende Lumi Haraguchi fra Aarhus Universitet havde glemt en alge-kultur i laboratoriet. Stor var hendes overraskelse,



De to stadier af artens livscyklus ses her som illustration af Sofie Binzer.

da hun senere genfandt prøven og af ren nysgerrighed studerede de alger, der var vokset frem. For algerne havde tilsyneladende skiftet art. Hun indgik et samarbejde med forskergrupper på Naturhistorisk Museum og Biologisk Institut, Københavns Universitet, og sammen kunne de påvise, at de to

tilsyneladende forskellige arter faktisk var en og samme art, men, at de morfologisk optræder i to meget forskellige former. Dét, Lumi havde fundet, var alger af samme art, som befandt sig på forskellige stadier i deres livscyklus. Den ene form havde et enkelt sæt kromosomer – og var såkaldt haploid, som man kender det fra højere organismers æg og spermier, til at være en organisme med to sæt kromosomer, i fagsprog at være diploid, som hos dyr og planter.

Forskerne fortsatte deres analyser i Roskilde Fjord og kunne påvise, at algerne skiftede mellem de to former, når der henholdsvis var mangel på, og rigelige, ressourcer. Studiet har afdækket, at enkeltcellede alger kan have en langt mere kompleks livscyklus end tidligere antaget.

Rasmus Rørbaek, *AU. Sci. Adv.*, Vol. 6, no. 37, eabb1611

Vandloppe æder  
furealger. Foto:  
Erik Selander

# ET VANDIGT VÅBENKAPLØB

Et evolutionært våbenkapløb mellem planktonalger og deres prædatorer har givet anledning til udviklingen af forsvarsmekanismer hos algerne og måder at omgå forsvaret hos deres prædatorer. Dette kapløb er kilde til stor biologisk mangfoldighed og bestemmende for nogle af havets vigtigste funktioner.

## Om forfatterne



Thomas Kiørboe er professor, dr. scient. og leder af Centre for Ocean Life ved DTU-Aqua. Forsker i samspillet mellem planktonorganismer og det omgivende miljø.  
tk@aqu.dtu.dk



Josephine Bøgeskov Grønning er ph.d.-studerende ved Centre for Ocean Life, DTU-Aqua. Forsker i forsvarsmekanismer hos planktonalger.  
jbgr@aqu.dtu.dk

**H**avet bebos af myriader af mikroskopiske planktonorganismer – en million liter havvand rummer således typisk mere end 1 million encellede organismer. For disse organismer – som for alle andre organismer – er nøglen til succes et spørgsmål om at “æde og ikke selv blive ædt”. Planktonalger – havets encellede planter – ædes af dyreplankton, men planktonalgerne har

udviklet et fascinerende batteri af forsvarsmekanismer: De kan flygte, de kan skræmme (med lys), de kan bevæge sig så stille, at de ikke opdages, de kan producere giftstoffer eller iføre sig harnisk. Men forsvar koster, og konflikten mellem at forsvare sig og formere sig driver et evolutionært våbenkapløb, som er en væsentlig kilde til biologisk mangfoldighed i havets frie vandmasser. Og bestemmende for nogle

af havets vigtigste funktioner. Lad os se på to eksempler, som vi har studeret:

### Skaltykkelse og havets kulstofpumpe

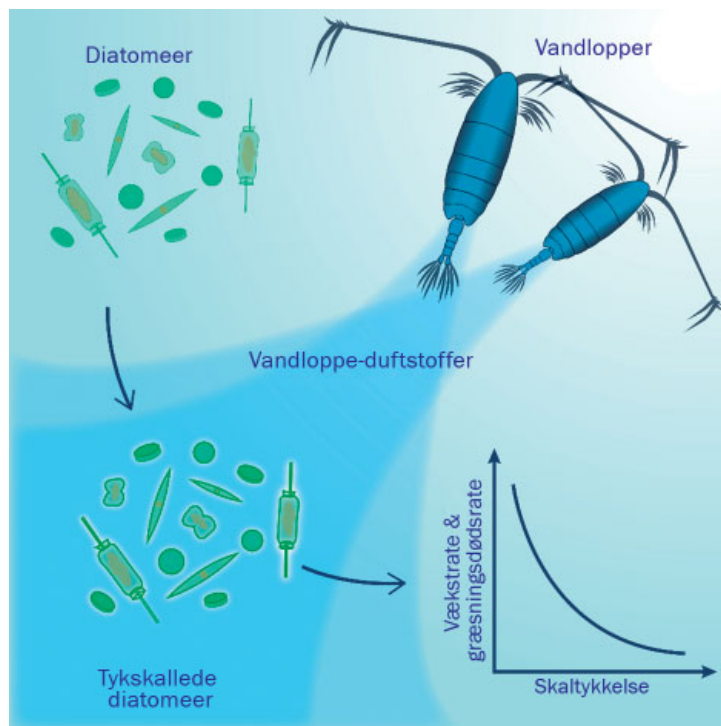
Planktonalger fikserer ligeså meget kuldiioxid fra atmosfæren som alle landjordens planter tilsammen, og *kiselaalger* står for omtrent halvdelen. Algen bor i en kiselskal, som giver et effektivt mekanisk forsvar.



I forhold til vægten er kiselaskallen det stærkeste biologiske materiale, man kender. Kraften, der skal til for at knække skallen, er enorm, svarende til en belastning på op til næsten 1 tons per kvadratcentimeter, ifølge målinger lavet af tyske forskere. Kiselalger ædes især af millimeterstore vandlopper og lyskrebs (krill), som ved en evolutionær tilpasning har udviklet særligt kraftige, hærdede mundlemmer, så de kan knække skallen. Hvis altså ikke skallen er for tyk. Vi har i laboratorieforsøg vist, at en vandloppes mulighed for at knække skallen afhænger af skallens tykkelse. Jo tykkere skal, des bedre forsvar. Men det koster at bygge en tykkere skal, og prisen er en lavere vækst og langsommere formering. Algerne kan imidlertid minimere udgifterne ved at tilpasse skallens tykkelse til risikobilledet: De kan lugte vandlopperne, og når koncentrationen af lugtstoffer øges, opruster kiselalgerne ved at bygge tykkere skaller. Forskellige grader af tilpasning til prædatorer giver anledning til store variationer i kiselalgers skaltykkelse, og til en stor artsrigdom.

De tykskallede kiselalger ædes altså ikke af dyreplankton, men når de dør, lækkes deres kulstofindhold til det omgivende vand, og den tomme skal synker til bunds. Ved Antarktis dræner denne proces havet for kisel med den følge, at kiselalgers vækst er begrænset af kisel i meget store områder.

Tyndskallede kiselalger, derimod, ædes af vandlopper, og noget af cellens kulstofindhold synker med vandloppens fækalier til bunds. De tyndskallede kiselalger kan dog også forsvare sig ved at klumpe sig sammen og synke hastigt mod bunden. Begge dele giver anledning til, at atmosfærisk kuldioxid fikseret af kiselalgen transporteres til dybhavet og dermed fjernes fra atmosfæren i tusind(er) år. Dette er den vigtigste komponent i havet biologiske kulstofpumpe, som årligt fjerner kuldioxid fra atmosfære i en mængde, der svarer til den menneskeskabte udledning.



Duftstoffer fra vandlopper (copepoder) stimulerer kiselalger (diatoméer) til at producere tykkere skaller. Det sker på bekostning af en lavere vækst. Til gengæld opnår algerne en bedre beskyttelse mod vandloppernes græsning.

### Gift-våbenkapløb giver hurtig evolution

Den mest artsrige gruppe planktonalger er *furealger* (dinoflagellater). Mange arter producerer giftstoffer, der er udviklet i et lignende evolutionært våbenkapløb med deres prædatorer, igen især vandlopper. Når giftstoffet virker efter "hensigten", æder vandloppen ikke de giftige celler – et effektivt forsvar. Vandloppen fanger de giftige celler, ligesom de fanger andre celler, men inden cellen ædes, undersøges den, og des større indhold af giftstof, des større er chancen for, at cellen bliver afvist. Det sker rasende hurtigt, inden for få millisekunder, og det er uklart, hvordan vandloppen kan vide, at en celle er giftig. I visse tilfælde kan cellerne signalere giftighed ved at udsende lysblink, når de håndteres af en vandloppe. Lidt ligesom en bi signalerer giftighed med sine gul-sortede alarmfarver. Furealger kan ligesom kiselalger også øge deres forsvar ved at producere mere gift, når de lugter vandlopper.

I nogle tilfælde virker forsvaret ikke, vandlopperne æder de giftige alger og dør eller bliver syge. Ikke godt

for vandlopperne, og for algen et dårligt forsvar. Det sker især, hvis man giver giftige alger til vandlopper fra områder, hvor der ikke normalt forekommer giftige alger. Men i løbet af blot et par generationer i laboratoriet sker der en naturlig selektion, og vandlopperne udvikler evne til enten at undgå algen eller tåle giftstoffet. Det sidste er ikke godt for algen. I naturen forekommer mange stammer af den samme algeart, hver med sin giftprofil. Vi forestiller os, at evolutionen gennem naturlig selektion hurtigt finder nye giftstoffer, der beskytter algen, ligesom sygdomsbakterier hurtigt kan udvikle resistens mod antibiotika. Dette stadige våbenkapløb mellem rov- og bytteorganisme driver altså en meget hurtig evolution, der giver anledning til stor biologisk mangfoldighed.

De giftstoffer, som nogle alger producerer, er meget potente og kan overføres til mennesker via skaldyr og fisk og give anledning til alvorlige forgiftninger. Vi taler om farlige nervegifte, der i værste fald kan være fatale. Derfor overvåges algesammensætningen i kystnære

Mikroskopiske kiselalger lever i en skal af kisel. →  
Foto: Nina Lundholm.

#### Videre læsning:

Grønning J, Kiørboe T (2020). Diatom defence: Grazer induction and cost of shell-thickening. *Functional Ecology*: doi.org/10.1111/1365-2435.13635

Pančić M, Torres RR, Almeda R, Kiørboe T (2019) Silicified cell walls as a defensive trait in diatoms. *Proc. R. Soc. B* 286: 20190184. doi.org/10.1098/rspb.2019.0184

Xu J, Kiørboe T (2018) Toxic dinoflagellates produce true grazer deterrents. *Ecology* 99:2240-2249. DOI: 10.1002/ecy.2479



områder, og fiskerier lukkes, når der er opblomstringer af giftige alger. Det kan give det kommercielle fiskeri meget store tab, især på den amerikanske vestkyst.

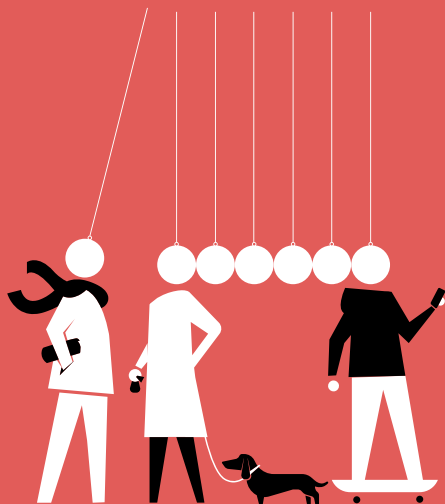
#### Et spørgsmål om omkostninger

Produktionen af giftstoffer er i de fleste tilfælde *tilsyneladende* omkostningsfri for algerne. Hvis man sammenligner væksthastigheden

mellem alger, der er induceret (af lugt fra vandlopper) til at producere gift med ikke-inducerede alger, så vokser de lige hurtigt. Det er en gåde, for hvis forsvaret er omkostningsfrit, ville man forvente, at de giftige alger, som ikke bliver spist, ville udkonkurrere de ikke-giftige alger. Det sker ikke. Mange furealger kan producere en vifte af giftstoffer, som vi tror hver især påvirker forskellige prædatorer og konkurrenter. Faktisk kan en meget stor del af genomet hos nogle giftige alger være dedikeret produktionen af giftstoffer ("sekundære metabolitter"). Omkostningen til syntesen af de enkelte stoffer er måske umålelig lille, men hvis algen konstant skulle producere hele batteriet, ville omkostningen være betydelig. Ved kun at producere de giftstoffer, der akut er brug for, bliver den aktuelle omkostning lille. Den virkelige omkostning er således investeringen i potentialet (genomet), hvilket måske er forklaringen på, at netop furealger, og andre grupper, der kan producere giftstoffer, vokser langsomt i forhold til andre alger. ■

Det Naturvidenskabelige Fakultet

# Mød de studerende på SDU



Hvordan er hverdagen på Datalogi?  
Taler underviserne på Biomedicin engelsk?  
Og hvordan vælger du studie, hvis du synes, at både Matematik og Matematik-Økonomi lyder vildt spændende?

På [sdu.dk/modos](https://sdu.dk/modos) kan du bl.a. møde studerende fra Syddansk Universitets 10 naturvidenskabelige bacheloruddannelser og få svar på dine spørgsmål om uddannelsesvalg, studiestart og studieliv.

Du vælger selv, om du vil aftale et online-møde, fx over Skype eller Messenger, eller om du vil sende den studerende en besked og få svar på mail.

sdu.dk/modos

#moedsdu

# Cannabis mod MRSA

**I**takt med at forekomsten af antibiotikaresistens stiger, stiger interessen for en kombineret behandling med flere medicintyper, som kan nedsætte det samlede forbrug af antibiotika.

Den grundlæggende udfordring for folkesundheden er, at flere og flere bakterier udvikler resistens over for kendte antibiotika. Der er derfor et akut behov for at identificere nye antimikrobielle stoffer, der kan bruges som alternativ til antibiotika i kampen mod multiresistente bakterier.

I ny forskning fra Roskilde Universitet har forskerne Håvard Jenssen, Torben Lund, Laura Daniela Martinienghi og Rie Jønsson undersøgt, om udvalgte kemiske forbindelser fra cannabis har en virksom effekt mod multiresistente gule stafylokokker (MRSA). Tilsvarende forsøg udført på blandt andet Syddansk Universitet har tidligere i år vist positive resultater, som med forskningen fra Roskilde Universitet suppleres med ny viden om den bakteriebekæmpende effekt af molekyler fra cannabisplanten i kombination med syv kendte antibiotika.

I de nye forskningsforsøg har de fire forskere gennem en relativ ukompliceret varmebehandling omdannet det naturligt forekomne stof i cannabisplanten cannabidiolsyre til cannabidol (CBD). Efterfølgende har de studeret effekten af CBD.

Forskningsresultaterne viser, at CBD i sig selv har en stærk antimikrobiel effekt mod MRSA, og at der derfor er potentiale til at udvikle CBD-baserede lægemidler, der kan bruges som alternativ til traditionelle antibiotika i behandlingen af MRSA.



## Potentiale for nye kombinationsbehandlinger

Forskningsresultaterne underbygger resultaterne fra anden forskning, og er den til dato mest systematiske test af den antimikrobielle effekt af CBD på et bredt sammensat spektrum af relevante bakterier:

Resultaterne dokumenterer for første gang en positiv effekt ved kombination af CBD og syv klassiske antibiotika, der i dag anvendes til behandling af mennesker, heriblandt præparatet Vancomycin, der bruges mod særligt komplicerede infektioner og som derfor ofte er lægernes sidste udvej i behandling af MRSA.

Resultaterne fra Roskilde Universitet dokumenterer dermed, at bekæmpes smitsomme gule stafylokokker med både CBD og et konventionelt antibiotikum, kan man opnå en såkaldt additiv effekt af de to medikamenter. Det betyder konkret, at en dosis af det ene medikament kan erstattes med en dosis af det andet uden, at behandlingen mister sin samlede effekt. Det vil sige, at bakterier kan bekæmpes effektivt selv med brug af væsentligt mindre traditionelt antibiotika.

## Udfordrer en indgroet skepsis mod medicinsk cannabis

Resultaternes store potentiale er altså, at man med en kombinationsbehandling med CBD og konventionelle antibiotika vil kunne reducere de doser af konventionelle antibiotika, som mennesker skal behandles med for at opnå effekt. Dermed har kombinationsbehandlingen også potentiale til at dæmpe udviklingen af antibiotikaresistens hos mennesker.

Cannabis til medicinske formål har ofte mødt modstand hos både politikere, befolkning og i dele af sundhedsvæsenet, der ser med skepsis på effekten af brug af cannabis. De nye resultater fra forskerne på Institut for Naturvidenskab og Miljø er et bidrag til at gøre debatten mere faktuel.

»De nye forskningsresultater dokumenterer lig tidligere forsøg effekten af CBD, og det kan være med til at legitimere behandling med præparater, der baserer sig på enkelte kemiske komponenter af medicinsk cannabis«, siger Håvard Jenssen. ■

*Link til den videnskabelige publikation (open acces): [www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7355595](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7355595)*

I laboratorierne på RUC bruger forskerne HPLC-apparatur til at separere CBD fra andre cannabismolekyler.  
Foto: Kasper Hornbæk

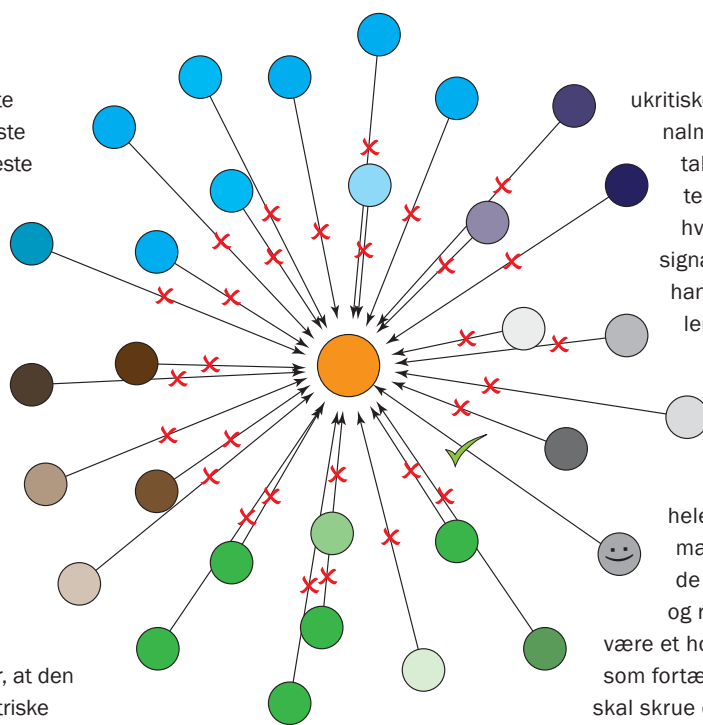
Af Torben Jarl Jørgensen,  
Institut for Naturvidenskab  
og Miljø, RUC

# FORSKERE AFSLØRER CELLERNES KOMMANDOCENTRALER

I cellerne jonglerer molekulære kommandocentraler rundt med tusindvis af signalmolekyler for at holde cellerne kørende som velsmurte maskiner. Danske forskere har afkodet, hvordan cellens kommandocentraler virker, og hvordan en særlig type dansende proteiner spiller en central rolle i al cellulær kommunikation.

**H**ver eneste dag, eneste time, eneste minut og eneste sekund bliver dine celler bombarderet med signaler. Det kan være signaler fra omverden, fra andre steder i kroppen, fra nabocellerne eller fra inde i cellerne selv. Nogle signaler fortæller cellen, at den skal lave flere eller færre proteiner, mens andre fortæller, at den skal ændre den elektriske ladning på cellemembranen. Nogle regulerer temperatur, mens andre styrer celledeling eller reparation af DNA'et.

Med det konstante bombardement af signaler har cellen brug for en mekanisme til at kontrollere, hvordan, hvornår, og i hvilket omfang de forskellige signaler bliver tolket og oversat til handling. Heldigvis er cellerne udstyret med kommandocentraler – såkaldte hub-proteiner – der fungerer ligesom dirigenten i et enormt symfoniorkester, hvor hvert enkelt cellulært signal er et instrument.



Hub-proteiner er helt centrale for, hvilke signaler der sendes videre i cellen. Her er vist op til 30 forskellige signalproteiner (de farvede cirkler), der samtidigt konkurrerer om at binde til et hub-protein (i midten). Et hub-protein af "date-typen", som i dette tilfælde, tillader kun et enkelt andet protein at binde sig til det, mens "party-hubber" godt kan binde flere proteiner samtidigt og derved lade flere signaler passere.

Hub-proteinerne vekselvirker med de forskellige signalmolekyler for at lade signalerne blive omsat til handling i cellen. Men ligesom dirigenten er hub-proteinerne ikke

ukritiske og lader alle signalmolekyler bestemme takten. Nej, de selekterer meget præcist, hvornår hvert enkelt signal skal omsættes til handling, hvilke signaler der har førstehorisitet, og hvad den videre handling skal bestå af.

»Cellerne bliver hele tiden udsat for en masse signaler, som de skal tage stilling til og reagere på. Det kan være et hormonelt signal, som fortæller cellen, at den skal skrue op for det ene eller andet gen. Det kan være, at cellen producerer for meget syre, så der skal skrues ned for syreproduktion og op for de mekanismer, som fjerner syren. Det kan også være, at saltkoncentrationen uden for cellen eller temperaturen stiger. Så skal cellen reagere på det og lukke ned eller åbne op for forskellige systemer,« fortæller professor Birthe B. Kragelund fra Biologisk Institut ved Københavns Universitet.

Birthe B. Kragelund har i sin forskning gået i dybden med forståelsen af hub-proteinerne, og hvordan

Om forfatteren  
Af Kristian Sjøgren,  
videnskabsjournalist.  
ksjoegren@gmail.com



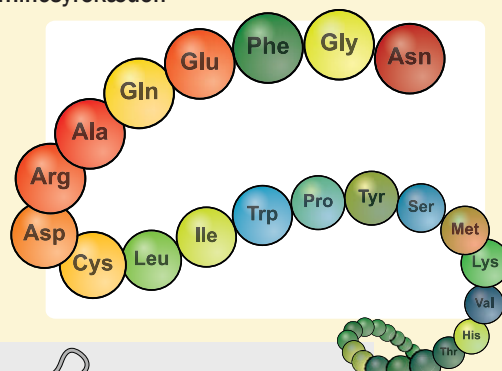
DANMARKS FRIE  
FORSKNINGSFOND  
INDEPENDENT RESEARCH  
FUND DENMARK

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 Aarhus Universitet, Michael Møller Hansen. Læs mere på [www.dff.dk](http://www.dff.dk)

Proteiner består af kæder af aminosyrer. Den traditionelle opfattelse har været, at den komplicerede struktur, som disse aminosyrekæder folder op i, er helt afgørende for deres funktion. Det er dog i dag klart, at der findes mange "uordnede" proteiner, der ikke har en fast tredimensionel struktur, men ikke desto mindre er højst funktionelle. Et eksempel er prolaktinreceptoren, som er vist nederst på siden.

### Den primære struktur aminosyrekæden



funktionen af dem afhænger af de proteiner, som de vekselvirker med.

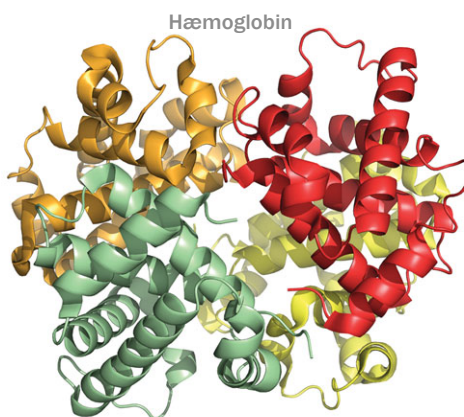
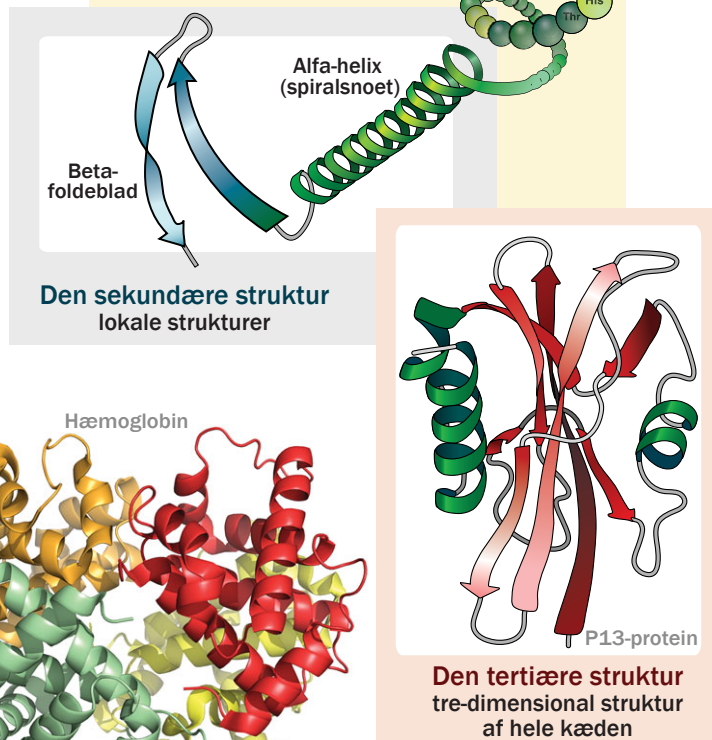
### Ordrede eller uordnede proteiner

Når vi taler om, at hub-proteinerne skal orkestrere signal-symfonien, taler vi om, at de selektivt skal være i stand til at binde til de på ethvert givent tidspunkt vigtigste signal-proteiner. Det nytter med andre ord ikke, at cellen får to modsatrettede signaler, eksempelvis at den skal vokse, og at der ikke er næring i omgivelserne, og at hub-proteinerne så forsøger at tvinge cellen til både at vokse og spare på ressourcerne på samme tid.

Dirigenterne skal i stedet være i stand til at filtrere hvert eneste instrument ud i symfoniorkestret og bestemme, om dens tone skal høres eller ej. Er svaret ja, sender hub-proteinet et signal videre til de systemer i cellen, som skal effektuere signalets meddelelse.

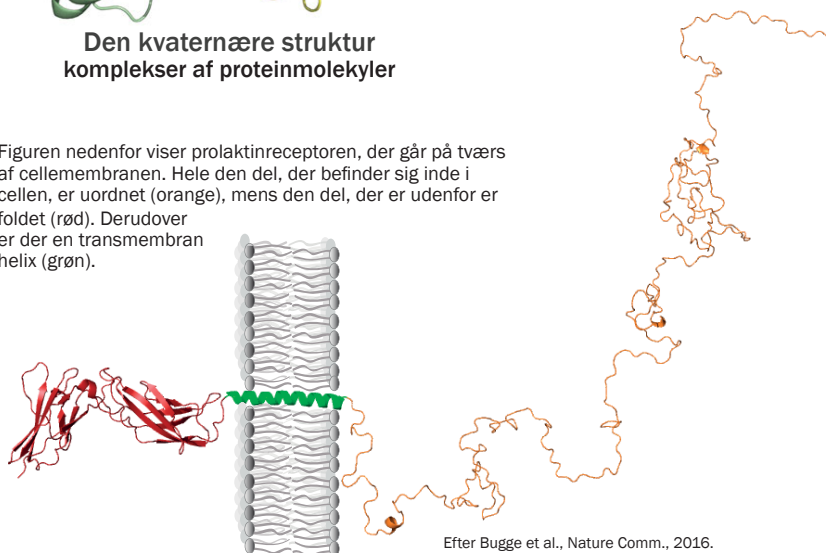
Her kommer så det store problem: Forskere har i lang tid kendt til hub-proteinerne, men alligevel har de haft meget svært ved at forstå, hvordan disse kommandocentraler kan være så fintunet selektive, som det er nødvendigt i så delikat et miljø som en celled indre. Hvordan kan de bestemme, om det ene eller andet protein skal binde til hubben, når nu disse signalmolekyler, der skal binde til hubben, ofte er ret ens i den proteinsekvens, som de binder med?

For at kunne besvare det spørgsmål, skal vi rundt om denne histories twist og Birthe B. Kragelunds



### Den kvaternære struktur komplekser af proteinmolekyler

Figuren nedenfor viser prolaktinreceptoren, der går på tværs af celledmembranen. Hele den del, der befinder sig inde i cellen, er uordnet (orange), mens den del, der er udenfor er foldet (rød). Derudover er der en transmembran helix (grøn).



forskningsmæssige hjertebarn.

Det er nemlig sådan, at hub-proteinerne kan være af to overordnede typer: *Ordrede proteiner* eller *uordnede proteiner*.

Ordrede proteiner er dem, som de fleste mennesker med en smule indsigt i proteinkemi tænker på, når de tænker på proteiner. Det er proteiner, som gennem

## Om de uordnede proteiner

Uordnede proteiner adskiller sig fra ordnede proteiner og den måde, som man traditionelt har betragtet struktur og funktion af proteiner på.

Ved kortlægningen af det humane genom omkring år 2000 opdagede forskere, at der i den genetiske kode lå opskrifterne på en masse proteiner, der ikke opfører sig, som proteiner oftest gør. "Normale" proteiner gør det, at de folder sig om sig selv og danner en specifik og forudbestemt struktur med givne funktioner, der ofte er baseret på netop strukturen. Det sker i store træk helt automatisk på basis af forskellige kemiske egenskaber i sekvensen af aminosyrer eller med hjælp fra såkaldte chaperoner.

De uordnede proteiner, som på engelsk kaldes for *intrinsically disordered proteins* (forkortet IDP), opfører sig ikke på samme måde og indretter sig ikke efter en forudbestemt struktur, men er mere som livlige lassoer, der danser rundt på en tilsyneladende vilkårlig måde. Derfor var den indledende antagelse da også, at disse dansende proteiner umuligt kunne have en funktion – for hvordan kunne de have det uden struktur? Det samme gjaldt specificitet eller bindingsaffinitet.

De seneste 20 års forskning i uordnede proteiner har dog vist, at de sagtens kan indgå i mere eller mindre faste strukturer med andre proteiner, hvilket man eksempelvis ser ved binding mellem hubber og signalmolekyler. I det tilfælde kan dele af det uordnede protein godt folde op i en struktur.

Samtidig er de uordnede proteiner rigtig gode til at vekselvirke med omgivelserne og gør det meget mere end de ordnede proteiner, som ofte blot har én struktur og typisk kan én ting. Man kan sammenligne de ordnede proteiner med en brødkniv. Den er til at skære brød med og kan ikke ændre sig til at blive til en god fiskekniv eller for den sags skyld en hvidløgspresse eller et spækbræt. De uordnede proteiner er derimod som schweizerknive, der kan det ene på det ene tidspunkt og det andet på det andet tidspunkt afhængigt af bindingspartnere og cellens behov.

Forskningen viser også, at i højerestående organismer som os mennesker er omkring 30 procent af vores proteiner multifunktionelle schweizerknive, mens bakterier har langt færre af disse proteiner. Uordnede proteiner ser altså ud til at have spillet en vigtig rolle i udviklingen af komplekst og multicellulært liv.

Der er mange velkendte proteiner, som er helt eller delvis uordnede. Det gælder blandt andet histon-proteiner. Disse proteiner er vigtige for organiseringen af DNA'et, og de har lange ustrukturerede dele. De proteiner, som står for hele oversættelsen af DNA til protein, blandt andet transkriptionsfaktorer og polymeraser, er også for en stor dels vedkommende uordnede. Det samme er væksthormonreceptoren, som har ustrukturerede dele. Ligeså prolaktinreceptoren, der er vigtigt for udvikling af brystvæv og mælkeproduktion i forbindelse med graviditet og efter fødslen. Endelig skyldes mange kræftformer mutationer i netop uordnede proteiner.

kemiske interaktioner er foldet op i en nydelig og fastlagt struktur.

I modsætning hertil er uordnede proteiner dynamiske som livlige, dansende lassoer.

"Hør hov! Dem har jeg aldrig hørt om," tænker du måske og med god grund.

Først ved kortlægningen af det humane genom ved årtusindeskiftet fik forskere øjnene op for, at proteiner overhovedet kan være uordnede og ikke følge de samme regler som alle andre proteiner. Forskerne blev endnu mere chokerede over at erkende, at svimlende 30 procent af alle proteiner i menneskekroppen faktisk ser ud til at være uordnede. Den erkendelse pillede natten over 100 års lærebogsfor-

ståelse af proteiner fra hinanden og igangsatte et helt nyt og banebrydende forskningsfelt, som Birthe B. Kragelund har været en del af lige siden.

Dette forskningsfelt har over årene slået fast, at de uordnede proteiner langt fra er ligegyldige kuriositeter, men spiller afgørende roller for alt fra risikoen for at få kræft til udvikling af neurodegenerative sygdomme som Alzheimers og Parkinsons.

»Vi har erkendt, at ikke alle proteiner opfører sig på samme måde, men at nogle opfører sig markant anderledes, fordi de netop er uordnede. Det giver dem nogle manøvreremuligheder, som andre proteiner ikke har. Gennem vores samarbejder fandt vi ud af, at netop hub-proteinerne for manges vedkommende

er uordnede, og det er klart, at det må spille en rolle i funktionen og selektiviteten af disse cellulære kommandocentraler,« forklarer Birthe B. Kragelund.

### Et samlingspunkt for signaler

Går vi et lag dybere i Birthe B. Kragelunds forskning, kan hub-proteinerne enten være ordnede eller uordnede. De ordnede binder fortrinsvis til uordnede signalmolekyler i form af proteiner, mens de uordnede fortrinsvis binder til ordnede proteiner.

Netop fordi hub-proteinerne kan binde til mere end 30 forskellige bindingspartnere, kalder man dem for hub-proteiner – de er et samlingspunkt for signaler. Hver af disse 30 eller flere forskellige signalmolekyler kommer med en

proteinsekvens, som kan genkende en matchende overflade eller lomme på hub-proteinet. Det vil sige, at op imod 30 forskellige proteiner på samme tid slås om at binde til det samme hub-proteins bindingssted og fortælle det, hvilke signaler den skal videreformidle.

»Man kan sige, at alle disse signalproteiner har den samme nøgle til at låse hubben op, men vi har indtil nu langt fra forstået, hvilke betingelser der på et givent tidspunkt tillader den ene nøgle at låse hub-proteinet op og ikke den anden nøgle,« siger Birthe B. Kragelund.

Skal vi komplicere historien en smule mere, kan man yderligere opdele hub-proteinerne i forskellige grupper. Der findes blandt andet date-hubber, som kun tillader ét signalprotein at binde ad gangen, og så findes der party-hubber, der kan binde til mange forskellige proteiner på samme tid. Partyhubberne bringer blandt andet signalmolekylerne sammen i et kompleks, så de forskellige signalmolekyler vekselvirker med hinanden for til sammen at afgøre det endelige signal, som hubben sender videre i systemet. Hubber kan desuden findes forskellige steder i cellen. Nogle flyder rundt i cytoplasmaet, andre befinder sig i cellekernen, mens party-hubber ofte sidder fast i cellemembranen.

### Nyt syn på bindingsstyrken

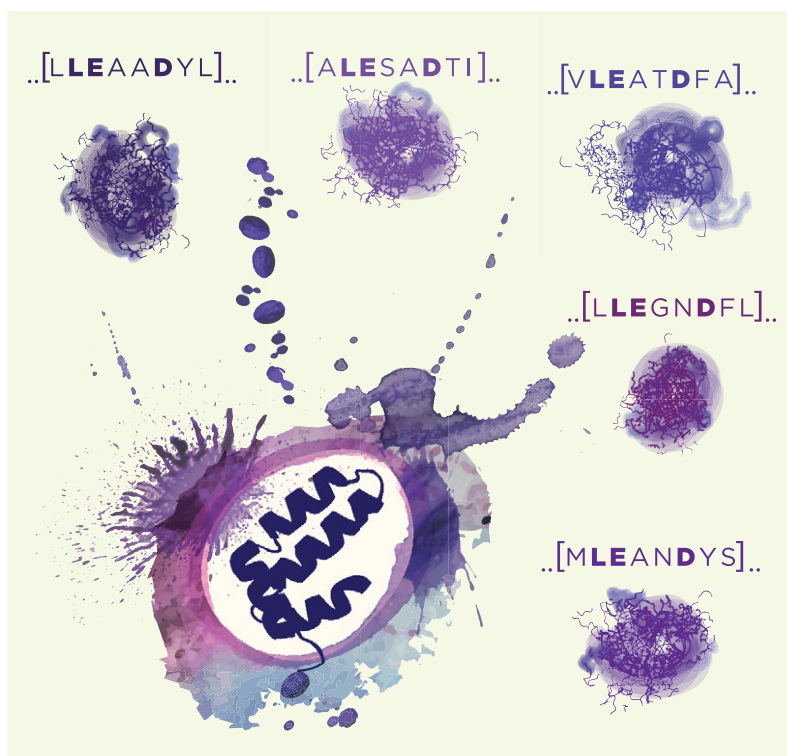
De forskellige hubber spiller forskellige roller i orkestreringen af livet som celle. Blandt andet spiller nogle en rolle i reparation af DNA, andre kordinerer oversættelsen af DNA til protein, og en helt tredje gruppe holder styr på cellens kemiske balancer. Ofte gør hubberne det, at når de binder til et signalmolekyle, ændrer det ved deres binding til eksempelvis DNA'et i cellen. Signalmolekylet kan enten få hubben til at binde tættere til DNA'et og på den måde blokere for, at det bliver repareret, duplikeret eller oversat til protein. Signalmolekylet kan også binde til hubben, så den slipper sit greb på DNA'et, og



Foto Leif Bolding

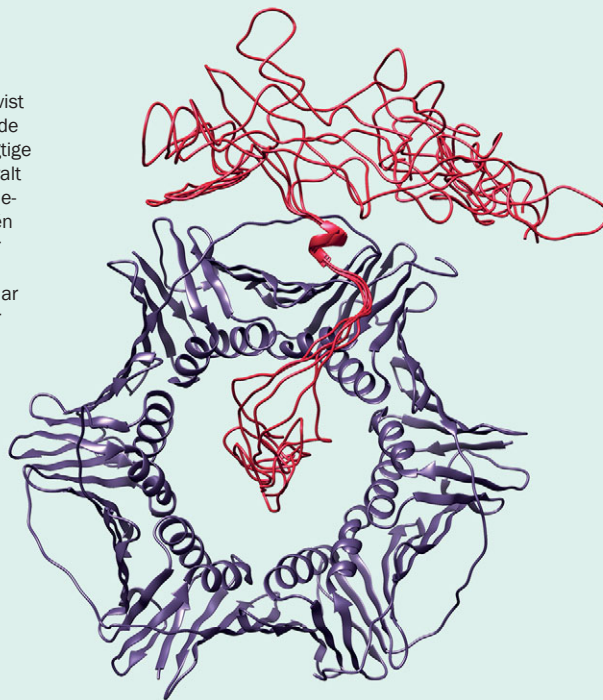
## Om Birthe B. Kragelund

Birthe B. Kragelund er uddannet biokemiker fra Odense Universitet i 1985. Hun blev ph.d. i 1996 gennem et samarbejde med Carlsberg Laboratorium og Odense Universitet, hvor hun også tilbragte en periode ved Oxford Universitet i England. Fra 1996 til 1998 arbejdede hun som postdoc ved Kemikercentrum på Lunds Universitet i Sverige og vendte tilbage til Danmark først for forskningsadjunkt og senere lektor ved Molekylærbiologisk Institut (nu Biologisk Institut) på Københavns Universitet. Siden 2013 har hun været professor ved Biologisk Institut, hvor hun sammen med tre kollegaer, Kaare Teilum, Kresten Lindorff-Larsen og Henriette E. Autzen, udgør hjørnestenene i det Strukturbiologiske NMR Laboratorium (SBIINLab) – et internationalt laboratorium med næsten 50 personer inklusiv studerende, postdocs, teknikere og gæster. Hendes primære forskningsinteresser er proteiner og biofysik med særligt fokus på *intrinsically disordered proteins* og NMR-spektroskopi.



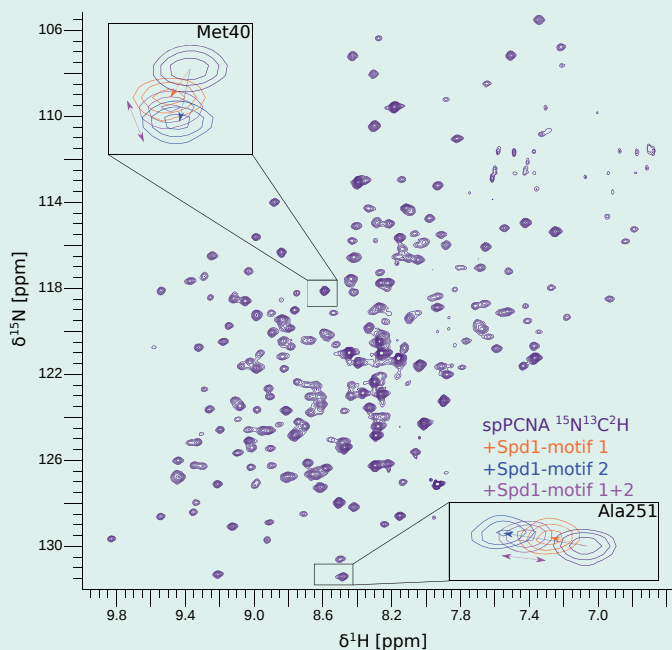
Figuren illustrerer strukturen af det foldede date-hub-protein RCD1's bindingsdomæne RST (det foldede domæne i den store, lilla ballon) og et udsnit af de mange uordnede bindingspartnere, der hver især har en variation af et bindingsmotiv og som alle binder til RST i konkurrence. illustration: Hanne Grønne

PCNA (Proliferating Cell Nuclear Antigen, vist i lilla) omkranser DNA og sørger for at binde en række enzymer og proteiner, der er vigtige for opretholdelsen af DNA. Det er et centralt hub-protein med 100-vis af bindingspartnere, og det kan binde op til 3 partnere på én gang. Strukturen viser PCNA fra gærceller (*S. pombe*) bundet til det lille, dynamiske uordnede protein Spd1 (vist i rødt), som har to konkurrerende PCNA-bindende motiver (upublicerede data).



Diagrammet viser en NMR-analyse af PCNA. Vi kan undersøge binding af de 2 konkurrerende motiver i bindingsproteinet Spd1 til PCNA (SpPCNA) med NMR-spektroskopi. Ved at undersøge hvert motiv for sig (Spd1-motif 1 og Spd1-motif 2) og derefter tilsætte begge motiver (Spd1-motif 1+2), kan vi ud fra positionerne af signalerne i NMR-spektret få indblik i populationerne af de forskellige bundne former.

Som vi kan se, ligger signalet for de enkelte motiver på hver side af det signal, vi ser, når begge motiver er til stede. Det fortæller os, at begge motiver binder i konkurrence, men at de binder med en dynamik, der tillader konstant udskiftning mellem dem. For at kunne optage NMR-spektrene, er proteinet mærket med både  $^{15}\text{N}$  og  $^2\text{H}$  (og  $^{13}\text{C}$ ). (upublicerede data).



alle processerne kan få frit lejde. Endelig kan hub-proteiner også binde til selve de proteiner, som udfører alle disse funktioner. Så alt i alt et komplekst system med en iboende balance.

I sin forskning har Birthe B. Kragelund sammen med et interdisciplinært konsortium af fire kolleger haft øjnene og luppen rettet mod blandt andet en hub, som binder til proteiner, der er involveret i reparation af DNA. Mere specifikt binder hubben til proteinerne,

så de kan binde til og reparere DNA'et. Proteinet hedder PCNA, og det er et ordnet protein, som kan binde til en lang række uordnede bindingspartnere. Alle PCNA's bindingspartnere binder til hubben via den stort set samme lille uordnede proteinsekvens, som slås om det samme lille bindingssite. De forskellige proteiner vil have hub-proteinet til at gøre noget forskelligt, og så bliver det meget vigtigt, at hubben forstår at lytte til de rigtige signaler, i forhold til hvad der er bedst for cellen.

Birthe B. Kragelunds konsortiums forskning viser, hvordan hubber, signalproteiner, uordnede- og ordnede proteiner spiller sammen om at løse problemet.

»Vores forskning viser, at det – modsat den traditionelle forståelse af protein-protein-interaktioner – ikke kun drejer sig om styrken af bindingen i bindingssitet. Egenskaberne i den uordnede kæde uden for bindingssitet har faktisk endnu større betydning for, om det ene eller det andet protein får lov til at binde sig til hubben og fortælle den, hvad den skal gøre. Vi har simpelthen været for snævre i vores syn på, hvad der bestemmer bindingsstyrke i hubber,« forklarer Birthe B. Kragelund.

I det uordnede protein uden for bindingssitet kan der ifølge Birthe B. Kragelunds forskning ligge en masse egenskaber, som afgør, hvor stærkt det ene eller andet protein binder til hubben. Elektrostatiske ladninger kan gøre, at det ene protein binder mange tusinde gange stærkere end det andet, og så bestemmer det protein, hvad hubben skal gøre.

Denne erkendelse er helt ny og forklarer, hvordan der kan være forskelle i 30 givne proteins bindingsaffinitet til samme hub. Det ligger ikke i selve bindingssitet. Der kan godt være små forskelle i bindingssitet, men de store forskelle ligger ofte uden for bindingsstedet, og der er der stor variation i de uordnede proteiner.

»Hvis mange positive ladninger gør, at man som signalprotein kan binde stærkt til hubben, og man kommer med en masse negative ladninger, så kan det være lige meget, om man kommer med den helt rette og optimale centrale proteinsekvens til at binde til hubbens bindingssite. Så kommer man ikke til at fortælle hubben, hvad den skal gøre,« siger Birthe B. Kragelund.

**Kan lede til bedre lægemidler**  
Opdagelsen af hubbernes funktionalitet har både grundforsknings-



mæssige og praktiske implikationer.

På det praktiske plan kan opdagelsen give lægemiddeludviklere endnu et greb af hive fat i, når de vil udvikle bedre lægemidler i fremtiden. Forestil dig, at du som lægemiddeludvikler gerne vil lave et aktivt stof, som binder til og hæmmer et protein, der er involveret i udvikling af sygdom. Her kan du udvikle et lægemiddelstof, som har det rette bindingssite, men det vil altid skulle konkurrere med andre proteiner om at få lov til at binde til netop det bindingssite. I det tilfælde kommer affinitet uden for bindingsstedet til at spille en stor rolle, og kan du udvikle et protein, som ikke bare har den rigtige proteinsekvens til at binde til det specifikke hub-protein inde i cellen, men derudover også kan øge dit lægemiddels affinitet flere tusinde gange i området uden for bindingssitet, kan du få et meget mere potent lægemiddel, som du også skal bruge meget mindre af for at få en effekt.

»I et af vores forsøg har vi øget et lille peptids affinitet 40.000 gange ved at ændre lidt på ladningsforskellen uden for bindingssitet. Det kan gøre en stor forskel, hvis vi taler om udvikling af lægemidler,« siger Birthe B. Kragelund.

Det andet perspektiv i erkendelsen er af grundvidenskabelig karakter – som selvfølgelig også kan vise sig af få betydning for lægemiddelvidenskaben på den lange bane.

Hubberne repræsenterer et netværk af kommunikationscentraler, som orkestrerer et enormt komplekst system for at holde cellen kørende. Hvis man blot ændrer en lille smule på det system, kan tingene falde fra hinanden, og med den indsigt, som Birthe B. Kragelund og hendes konsortium har bragt på bordet, får forskere nu en bedre forståelse af, hvordan tingene kan gå galt.

Lad os lave den antagelse, at vi i et forsøg med nogle celler gerne



Postdoc Andreas Prestel i færd med at indsætte en prøve i NMR-spektrometeret, som er et centralt instrument i Birthe Kragelunds forskning. Foto: Leif Bolding

vil hæmme en given proces for at se, hvad der så kommer til at ske med cellen. Vi kan selvfølgelig hæmme det signalmolekyle, som fortæller hubben, hvordan den skal tolke signalet. Problemet er dog, at signalmolekyler kan binde til mange forskellige hubber, og så mister vi hurtigt overblikket over, hvilke processer vi egentlig hæmmer.

En anden mulighed er at hæmme hubben, men så påvirker vi også mange forskellige processer, da hubberne sjældent kun regulerer én cellulær funktion, men flere.

»30 forskellige bindingspartnere kan repræsentere 30 forskellige processer, men vi vil kun hæmme én. Hvordan gør vi det, hvis vi ikke forstår, hvordan de er forskellige i deres binding? Derfor er det nødvendigt, at vi ikke som tidligere kun kigger på, hvor hub-proteiner og bindingspartnere er ens, men hvor de er forskellige, og det er ikke i bindingssitet, men udenfor. Normalt er vi forskere drevet af at finde mønstre i det, som vi studerer, men lige akkurat i tilfældet med hubberne og de uordnede proteiner skal vi i stedet til at kigge på det, som ikke er et umiddelbart mønster, og prøve at forstå det,« forklarer Birthe B. Kragelund.

### Større forståelse af molekylær kommunikation

I forskningen har Birthe B. Kragelund sammen med sine kollegaer benyttet en lang række forskellige analyseteknikker til at kortlægge struktur og funktion af hubber og bindingspartnere. Blandt tusindvis af hubber har de udvalgt tre, som de har kortlagt strukturen af, både når de er bundet til bindingspartnere, og når de ikke er.

Den ene af hubberne er en uordnet partyhub i membranen, mens de to andre er ordnede date-hubber, som binder til uordnede proteiner.

Ved at kende til strukturerne, hvilket vil sige både de tredimensionelle former, samt sekvenserne af de uordnede proteiner, kunne forskerne med brug af komplicerede computeralgoritmer afgøre, hvordan orden og uorden bidrager til diversitet og pålidelighed i hub-bindingspartner-interaktionerne, så der ikke sker miskommunikation i cellen.

»Det er en dybere forståelse af, hvad molekylær kommunikation i cellerne egentlig er, og hvordan det koordineres med orden og uorden i proteinerne,« siger Birthe B. Kragelund. ■

### Interdisciplinært samarbejde

Forståelsen af hub-proteinernes funktion i cellens interne og eksterne kommunikation har krævet et interdisciplinært samarbejde. Foruden Birthe B. Kragelund har flere andre forskere bidraget til forskningen med hver deres ekspertområde.

Professor Olaf Nielsen fra Biologisk Institut ved Københavns Universitet er genetiker og ekspert i at studere proteiner, der er involveret i kopiering af DNA'et i levende gærceller.

Celle- og cancerbiolog Professor Stine Falsig Pedersen har i projektet studeret funktionalitet af den membranbunde hub NHE1. Hun har også set på, hvad der sker, når man muterer hub-proteiner og enten bringer flere aminosyrer i bindingssitet i spil eller slår bindingssites ud.

Lektor Wouter Krogh Boomsma fra Datalogisk Institut på Københavns Universitet er bioinformatiker og kan jonglere med komplekse datasæt gennem machine learning.

Professor Karen Skriver fra Biologisk Institut på Københavns Universitet har som den eneste af samarbejdspartnerne interesseret sig for hub-proteiner i mange år. Hendes fagområde er hub-proteiner i planter.

Endelig er der professor Birthe B. Kragelund, som foruden at være hub på forskningsprojektet også har fire højfelts NMR-magneter, der er blandt de stærkeste i hele Danmark og særdeles velegnede til at kortlægge strukturen af dynamikken af proteiner.

### Videre læsning:

Bugge & Staby et al., Structure, 26(5):734-746.e7. doi: 10.1016/j.str.2018.03.013



**DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND**  
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

# VISUALISERING AF DANMARKS KULTURARV

Visualisering som metode til at afsløre mønstre i store mængder data er et stærkt redskab til at bygge bro mellem datalogi og andre forskningsområder. Værdien af visuelt design bliver her demonstreret med et eksempel bygget på Dansk biografisk leksikon.

## Forfatteren



Stefan Jänicke er adjunkt ved Institut for Matematik og Datalogi, Syddansk Universitet. [stjaenicke@imada.sdu.dk](mailto:stjaenicke@imada.sdu.dk)

I sin ph.d.-afhandling fra Leipzig Universitet, Tyskland i 2016, undersøger Stefan anvendelsen af visualiseringsteknikker til at understøtte sammenlignende analyser af data indenfor digital humaniora. Han har siden beskæftiget sig med at udvikle informationsvisualisering og visuelle analytiske teknikker indenfor et bredt spektrum af interdisciplinære forskningsprojekter, der adresserer aktuelle forskningsspørgsmål indenfor (digital) humaniora, samfundsvidenskab, biologi og sport.

Artiklen er oversat fra engelsk og redigeret af Carsten R. Kjaer.

Maleriet *Udslidt* af den socialrealistiske maler Hans Andersen Brendekilde (1857-1942) kan ses som en kunstnerisk implementering af ordsproget "et billede siger mere end tusind ord". Maleriet skildrer det barske liv i landdistrikterne i slutningen af det 19. århundrede i Danmark, og det viser en mand, der er faldet om (måske død?) af sit hårde arbejde og hans skrigende kone på den bare mark, der indrammer scenen. Selvom forrige sætning også giver en detaljeret beskrivelse af problemstillingen, formidler maleriet øjeblikkeligt og meget bedre det socialkritiske budskab til observatøren.

Når vi forskere snakker om *visualisering* som en metode til analyse af data, der vises på skærmen, udnytter vi her den menneskelige evne til hurtigt at opfatte mønstre, der ligger gemt i disse data. En visuel designproces oversætter fænomener fra den virkelige verden til visuelle repræsentationer, som gør fænomenerne lettere tilgængelige for observatøren. I denne proces transformeres objekter relateret til fænomenet til dataenheder, der er beskrevet ved specifikke attributter og relationer mellem dem. Disse attributter og relationer oversættes derefter til visuelle repræsentatio-



Figur 1. Maleriet *Udslidt* af H.A. Brendekilde (1889)

ner, som kan afspejle de mønstre, der forekommer.

En sådan proces involverer altid en forvrængning, og derfor skal den udføres med omhu for at sikre, at man på baggrund af en visualisering kan drage brugbare konklusioner. Visualiseringer er specielt nyttige værktøjer for fagfolk, der ikke selv er eksperter i datalogi, til at generere og bekræfte hypoteser ud fra digitale datasæt indenfor deres fagområde.

Igennem de seneste ti år har jeg arbejdet sammen med eksperter fra

forskellige fagområder, og de fleste af mine projekter har været tværfaglige samarbejder med forskere fra humaniora indenfor rammerne af det, man kalder *digital humaniora*. De seneste ti års bestræbelser på at digitalisere vores kulturarv har betydet, at humaniora-forskere i dag har adgang til store mængder digitale data. Digital humaniora som forskningsområde går ud på at udvikle løsninger, som kan få mening ud af alle disse data. I denne sammenhæng har visuel udforskning vist sig som et værdifuldt instrument, der får mere og mere betydning for tilvejebringelsen af

ny viden. I denne artikel vil jeg give eksempler på, hvordan visualisering kan afsløre information om forskellige aspekter af Danmarks kulturarv.

### Visuel udforskning af Dansk Biografisk Leksikon

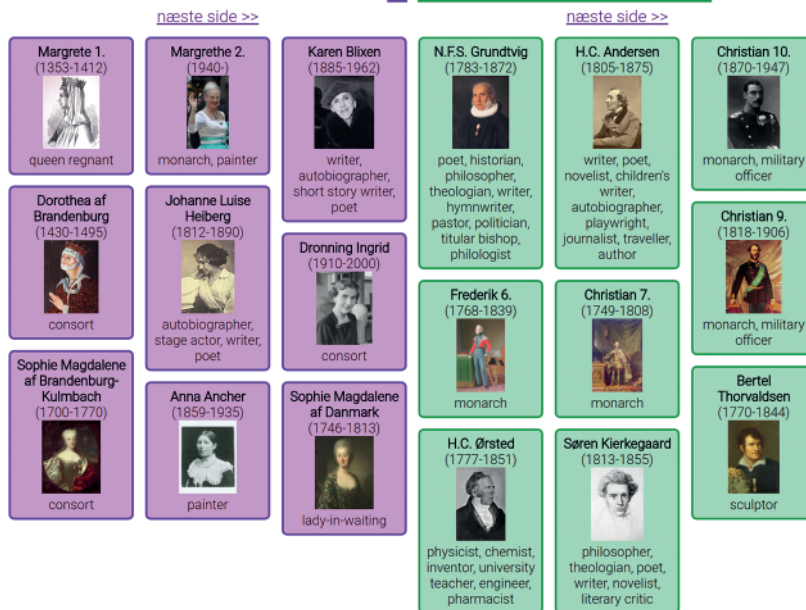
I en artikel om kulturarv understreger den humanvidenskabelige forsker Elena Franchi, at alle mennesker bidrager til verdens kultur. Hvor vigtig en person er for kulturarven kan aflæses af, hvor meget der bliver skrevet om denne person. De mest indflydelsesrige personer for Danmarks kulturarv findes derfor sandsynligvis i Dansk Biografisk Leksikon (DBL). Den tredje og sidste udgave, der blev udgivet mellem 1979 og 1984, indeholder biografisk information om cirka 20.000 personer, både danskere og udlændinge, der i høj grad har bidraget til dansk socialliv og kultur. For omkring 6.000 af disse personer findes der en indgang på den danske udgave af Wikipedia. Det kan man dermed opfatte som en digital udgave af Dansk Biografisk Leksikon (her kaldet dDBL), der omfatter de personer med mest nutidig relevans. Her findes en række strukturerede biografiske oplysninger om køn, levetid, fødested og erhverv for et stort antal personer, hvilket giver et passende grundlag for en visuel udforskning, hvor vi fokuserer på sammenligning af kvinder og mænd i dDBL.

Kønsforholdet i dDBL kan afbilledes som et simpelt søjlediagram (se figur 2). Denne første meget basale form for visuelle repræsentation af data afslører den stærke kønsbalance i DBL nøjagtigt, da det viste forhold svarer til det, man finder i den tredje trykte udgave, hvor cirka 7-8 % er kvinder. Søjlediagrammet er koblet med en listevision, der ordner alle kvinder og mænd i henhold til deres antydede indflydelse på den danske kulturarv. Denne indflydelse er skønnet ud fra mængden af tekst i de pågældende personers Wikipedia-opslag; jo mere tekst, der er skrevet om en person, jo større skønnes vedkommendes indflydelse at være.

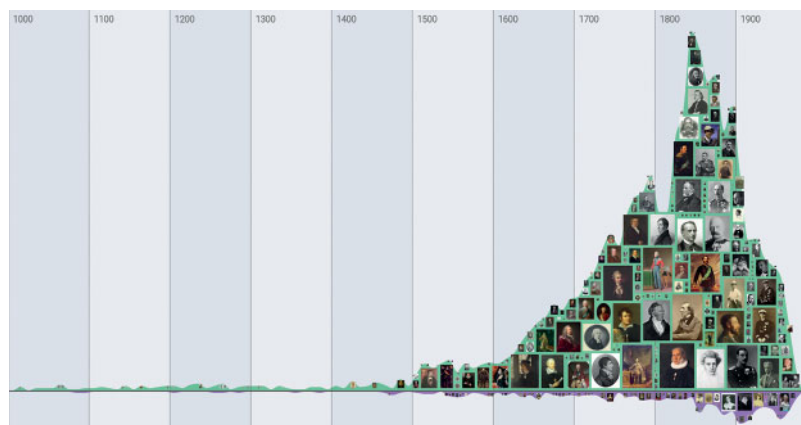
kvinder mænd

385

5653



Figur 2. Øverst ses et søjlediagram, der viser antallet af henholdsvis mænd og kvinder, der findes i dDBL (som er de personer, der er omtalt på Wikipedia og som også findes i 3. udg. af Dansk Biografisk Leksikon fra 1979-1984). Nedenunder ses en listevision, hvor personerne er rangordnet efter deres indflydelse vurderet ud fra mængden af tekst om dem. Samtlige personer er listet, og man kan klikke sig ind på de korresponderende Wikipediaopslag ved at klikke på en person.



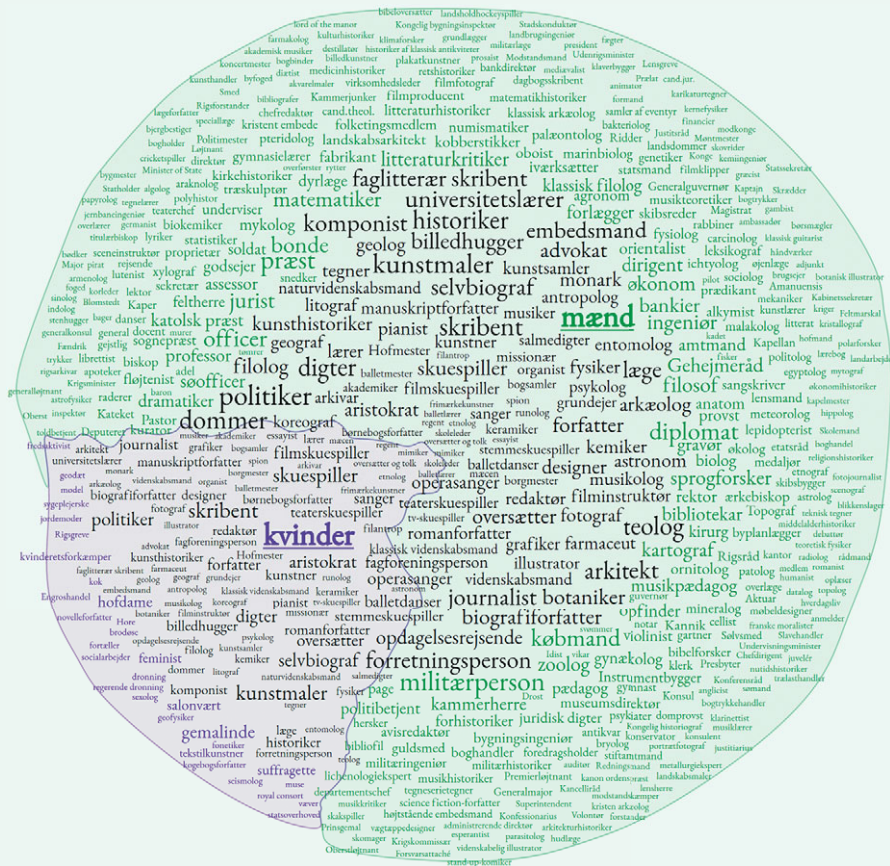
Figur 3. Tidslinje, hvor den grønne kurve viser mænd, og den lilla kurve viser kvinder i dDBL. Personerne er grupperet i årtier ud fra gennemsnittet af leveår (for eksempel er H.C. Ørsted placeret i 1840, da det ligger præcist midtvejs mellem fødsels- og dødsåret (1805-1875). Endnu levende personer er placeret efter fødselsår plus tyve år, og hvis fødselsåret ikke er kendt, placeres personen efter dødsår). Højden på kurverne afspejler antallet af personer. De små billeder angiver de vigtigste personer for den pågældende tid vurderet ud fra mængden af tekst om dem i dDBL.

For at understøtte muligheden for at søge information i de biografiske data har jeg designet tre interaktive, visuelle grænseflader, som alle understøtter en sammenlignende analyse af biografiske oplysninger i relation til køn.

Den første af disse visuelle grænseflader viser en tidslinje, hvor kvinder og mænd er adskilt i to separate kurver (se figur 3). De små billeder placeret på kurver-

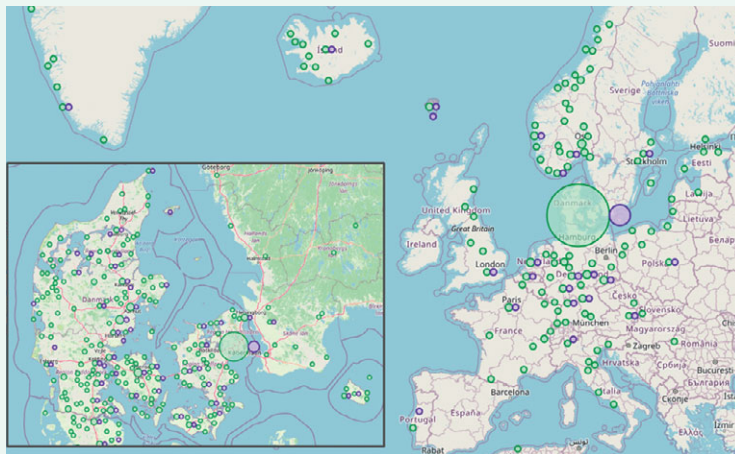
ne viser de personer, der har haft den største indflydelse i bestemte tidsperioder. Mens det store antal mænd i det 19. århundrede tegner den danske guldalder, en periode med usædvanlig kreativ produktion, fik kvinder tilsyneladende stor opmærksomhed, da den første udgave af DBL blev udgivet mellem 1887 og 1905.

Den anden visuelle grænseflade er et kort, hvor personernes fødeste-



Figur 5: Ordsky, der sammenligner erhverv for de kvinder (lilla) og mænd (grøn) i dDBL, hvor oplysning om erhverv findes (i alt 5.127 personer). Sorte ord er erhverv, som både mænd og kvinder udførte. Hvis lige mange kvinder og mænd udøvede et erhverv, placeres ordet tæt på ordskyens centrum, mens ordet flyttes væk fra centrum, når kønsforholdet er skævt. Skriftstørrelsen afspejler, hvor mange personer, der udøvede det pågældende erhverv.

Figur 4. Kort der viser placeringen af fødesteder for personer i dDBL. Størrelsen på en cirkel afspejler antallet af personer, der er født i en bestemt region. Man kan bemærke, at mange personer, der har spillet en rolle for dansk kulturarv, faktisk er født uden for Danmark.

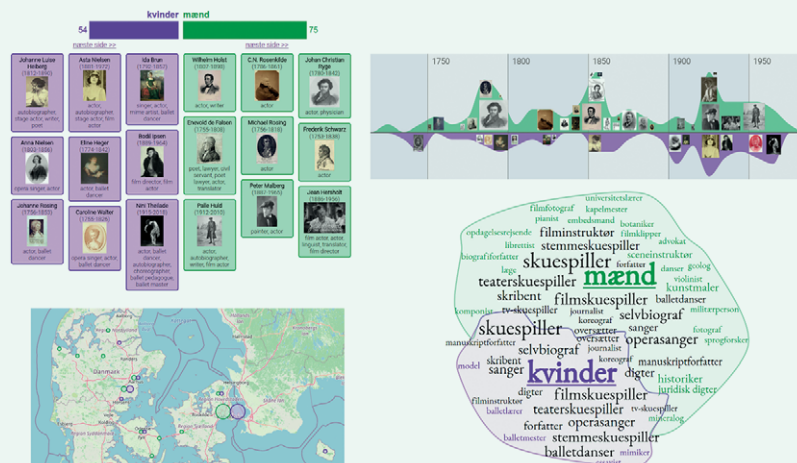


der er vist med cirkler (det skal dog nævnes, at oplysninger om fødested kun gives for cirka halvdelen af personerne i dDBL). Denne grænseflade understøtter spørgsmål som: *Hvilke personer af historisk betydning blev født i min by?* Selvom de fleste personer i dDBL blev født i Danmark, dokumenterer den vidt udbredte fordeling af cirkler en international indflydelse på Danmarks kulturarv.

Den tredje visuelle grænseflade er en såkaldt ordsky-visualisering, der illustrerer forskelle og ligheder på erhvervene hos kvinder og mænd i dDBL (figur 4). Ord farvet med lilla eller grønt repræsenterer erhverv, der henholdsvis kun blev udøvet af kvinder eller mænd, mens ord farvet med sort er erhverv, der blev udført af begge køn. Skriftstørrelsen afspejler, hvor mange personer, der har udøvet det pågældende erhverv. De sorte ord er endvidere placeret i forhold til deres kønsbalance.

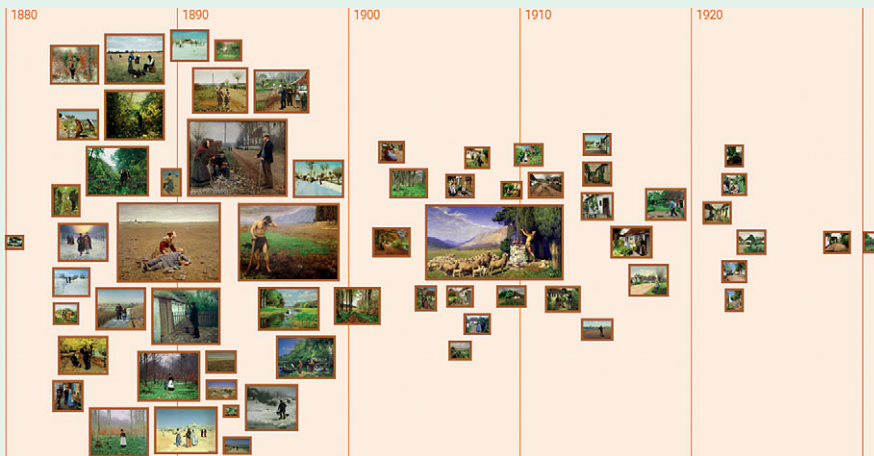
Ved brug af det samme farveskema giver hver af de tre visuelle grænseflader et øveblik over fordelingen af personattributter vedrørende køn, tid, fødselssted og profession. Størrelsen på de visuelle attributter afspejler altid mængder, dvs. hvor ofte en specifik attribut optræder hos alle personerne i datasættet. Alle grænseflader er forbundet med hinanden, og muligheden for at vælge specifikke attributter via klik med musen gør det muligt at udforske datasættet visuelt på mange måder. Alle visninger opdateres kun med de personer, der matcher den specifikke forespørgsel, og forespørgslen kan sammensættes af valg, der vedrører flere attributter. Hvis man for eksempel vælger et tidsinterval fra 1700 til 2000 på tidslinjen og erhverv relateret til skuespil i ordskyen, efterlader dette 129 personer med et langt mere afbalanceret kønsforhold (se figur 6).

Dette case studie om dDBL illustrerer, hvordan visualiseringer kan frembringe letopfattede mønstre, der kan guide brugeren i en visuel



Figur 6: En visualisering af et søgeresultat i dDBL, som er fremkommet ved at vælge tidsintervallet 1700 til 2000 på tidslinjen og samtidig vælge erhverv relateret til skuespil i ordskyen. Dette giver 129 personer med et rimeligt afbalanceret kønsforhold. Kortet afslører, at skuespil er et ret "urbant erhverv", da personerne typisk blev født i store byer.





Figur 9. 64 af Hans Andersen Brendekildes malerier arrangeret på en tidslinje. Størrelsen på billederne afspejler deres virkelige størrelse. Det er umiddelbart tydeligt, at Andersens værker fordeler sig i to distinkte perioder – den første med store, ofte socialkritiske malerier, og den anden med mindre og mere idylliske skildringer.



Figur 10. Udateret maleri af Hans Andersen Brendekilde. Størrelsen på billedet antyder, at det mest sandsynligt hører hjemme i hans første kreative periode og dermed snarere kan tolkes som en skildring af det hårde liv på landet frem for et idyllisk sceneri.

#### Videre læsning

Elena Franchi, *What is cultural heritage?*, in Smarthistory, August 8, 2015, accessed May 10, 2020

<https://smarthistory.org/what-is-cultural-heritage>

[https://da.wikipedia.org/wiki/Kategori:Personer\\_i\\_Dansk\\_Biografisk\\_Leksikon](https://da.wikipedia.org/wiki/Kategori:Personer_i_Dansk_Biografisk_Leksikon), accessed June 11, 2020

B. Shneiderman, *The eyes have it: a task by data type taxonomy for information visualizations*, Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages, Boulder, CO, USA, 1996, pp. 336-343.

Da Kirkegaard røg i flæsket på Andersen: <https://videnskab.dk/kultur-samfund/da-kirkegaard-rog-i-flaesk-et-pa-andersen>

karakterer snarere tænker (der er mange varianter af ordet “tænke”) og spørger (“spurgte”), mens Kierkegaards karakterer synes at forstå (mange varianter af “forståelse”). Man kan sammenfatte det sådan, at Andersen tegner et fantasifuldt, bevidst naivt billede af verden, der stiller spørgsmål til, hvordan den fungerer, mens Kierkegaard leverer moderne, realistiske svar. Således kan man konkludere, at de to forfattere har været gensidigt befrugtende, komplementære personligheder i deres tid.

#### Et fjernt syn på Brendekildes malerier

I lighed med begrebet *Distant reading* refererer *Distant viewing* til en kvantitativ analyse af visuelt materiale. Ved at kortlægge billeder på en meningsfuld måde, kan vi afsløre mønstre og derved måske blive i stand til at drage konklusioner. Dette er allerede antydnet med eksemplet med dDBL, hvor

personer med indflydelse på dansk kulturarv er vist på en tidslinje (figur 3). Vi anvender nu en lignende metode på Hans Andersen Brendekilde og arrangerer 64 af hans malerier på en tidslinje (figur 9). Den relative størrelse på billederne i visualiseringen afspejler den virkelige størrelse på malerierne, hvilket betyder at højden på tidslinjen afspejler, hvor stort et areal Brendekilde malede i et bestemt tidsinterval.

Visualiseringen gør det med det samme tydeligt, at Brendekildes værker placerer sig i to distinkte, kreative perioder. Den første periode fra omkring 1880 til 1900 har det førnævnte socialkritiske maleri *Udslidt* i sit centrum. Det er omgivet af andre malerier som *En Landevej* eller *Fortrykt*, der ligeledes skildrer problemstillinger vedrørende livet i landdistrikterne. Andre malerier illustrerer scener i Middelhavsområdet med udgangspunkt i Brendekildes besøg i Italien,

Egypten, Palæstina og Syrien.

I den anden periode fra omkring 1900 til 1930 skiller det religiøse maleri *Abels tilbud* (1908) sig ud. Denne periode er ellers kendetegnet ved små malerier, der viser idylliske scener fra landlivet, hvilket står i kontrast til de socialkritiske temaer i den første periodes malerier.

Samlingen indeholder også udaterede malerier, såsom det, der er vist i figur 10. Den afbillede scene giver plads til fortolkninger. Det kan vise en idyllisk familiescene om vinteren med en gammel mand, der skovler sne med sit barnebarn og en kat, der viser vejen til husets varme indre. Eller det kan vise det hårde, isolerede liv på landet, hvor man var oppe imod naturens vældige kræfter. Da maleriet er ret stort, synes sidstnævnte fortolkning, der placerer maleriet i Brendekildes første kreative periode, mere sandsynlig, fordi han i den anden kreative periode sjældent skildrede det idylliske landskab på store lærreder.

#### Bygger bro mellem fagområder

Selvom en del af de mønstre, der afsløres af sådanne visualiseringer, næppe vil komme som en overraskelse for eksperter indenfor de relevante fagområder, er det veldokumenteret i litteraturen, at sådanne nye perspektiver er i stand til at generere nye hypoteser om selv meget velstuderet materiale. En yderligere fordel ved denne intuitive og legende visuelle formidling af information er, at den har stort potentiale for at engagere almene borgere i at interagere med samfundsrelevante data.

Eksemplerne i denne artikel viser, at en og samme visualiseringsteknik kan understøtte vidt forskellige forskningsundersøgelser. Denne generaliserbarhed er uvurderlig, da den rummer potentialet til at bygge bro mellem datalogi og mange andre fagområder. Uden visualiseringer vil algoritmiske metoder ofte være utilgængelige, resultater vil være uforståelige og iboende mønstre i data vil forblive skjult. ■



## UNDERVISNING ON DEMAND

### Ny mulighed for gymnasielærere

På AAU's nye streamingplatform finder du materiale, du kan bruge i din undervisning. Du kan streame videoer og downloade opgaver til en lang række gymnasiefag. Der er emner inden for teknologi, dansk, samfundsfag, naturvidenskab og mange flere. De første videoer er live og til november udvides universet med yderligere 20 nye videoer.

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

**AAU PLAY**

Integrér AAU-forskere  
i din undervisning



**AALBORG UNIVERSITET**  
AALBORG ESBJERG KØBENHAVN

# DA SAMFUNDET BLEV ELEKTRIFICERET

Foto: Colourbox

**Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen var en afgørende forudsætning for, at man har kunnet udvikle det el-net, vi alle tager for givet i dag. Men det har langt fra været en lineær proces. Det viser et nærmere studium af de første skridt på vejen.**

## Om forfatteren



Henry Nielsen er lektor emeritus ved Center for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet. Et hovedemne i hans forskning har været den videnskabelige og teknologiske udvikling siden ca. 1900 med særlig fokus på elektrificeringens og atomteknologiens historie. [henry.nielsen@css.au.dk](mailto:henry.nielsen@css.au.dk)

**F**orestil dig, at alle Danmarks elværker en vinternat bliver sat ud af funktion, for eksempel gennem et stort, velkoordineret hackerangreb. Når du vågner om morgenen og forsøger at tænde lyset, sker der ikke noget. Du famler dig i mørke hen til kaffemaskinen for at brygge en kop kaffe at styrke dig på, men den virker heller ikke. Du griber mobiltelefonen for at se nyheder eller for at komme i forbindelse med en ven, men du har desværre glemt at lade mobilen op dagen før, og nu er det det ikke længere muligt. Du styrter ud af huset og hen ad en mørklagt gade for at tage S-toget eller Letbanen ud af byen, men der kører ingen

tog, og skiltene på perronen viser heller ingen besked. Det er et mareridt, og det er først lige begyndt...

## Hvordan det elektriske system blev til

Det moderne elektriske system, som regnes for kritisk infrastruktur i stort set alle lande på kloden, har rødder tilbage til Ørsteds og Faradays videnskabelige opdagelser i hhv. 1820 og 1831. Men vejen fra disse epokegørende opdagelser til vore dages ufatteligt komplekse elektriske system er langt fra lineær og ligetil. Det viser et nærmere studium af, hvad der faktisk skete i årene fra 1820 til 1882, hvor verdens første elværk blev indviet, og i

årene videre frem til omkring 1930, da alle industrinationer var ved at være spundet ind i et netværk af elværker, transformatorer, distributionssystemer og elforbrugende apparater hos millioner af forbrugere. Ørsteds og Faradays opdagelser var naturligvis en forudsætning for Edisons, Teslas og mange andres opfindelser. Men disse videnskabelige opdagelser var almindelig kendt af alle opfindere, der syslede med elektricitet i 1800-tallet, og det var for eksempel ikke dem, der inspirerede Edison til at gå i gang med udvikling af elektrisk belysning.

Midt i 1870'erne havde Edison etableret sig som selvstændig opfinder med eget laboratorium i



Menlo Park, hvortil var knyttet en større medarbejderstab af specialister på mange felter. At han var nået så langt, skyldtes ikke kun, at han var en kreativ person på mange områder, men også at han konsekvent gik efter projekter med betydeligt markedspotentiale. Indtil 1878 havde han mest beskæftiget sig med at udvikle og kommercialisere diverse telegrafopfindelser, men det år begyndte han på noget helt nyt.

Ideen kom til ham, da en af hans økonomiske rådgivere i foråret 1878 fortalte ham, at den helt store sensation i Paris og London det år var demonstrationer af elektrisk gadebelysning ved hjælp af selvregulerende kulbuelamper på fashionable steder i de to megapoler. Disse lamper gav et så stærkt og blændende hvidt lys fra sig, at de næsten forandrede nat til dag, og fik den velkendte gadebelysning med gaslamper til at virke håbløst gammeldags.

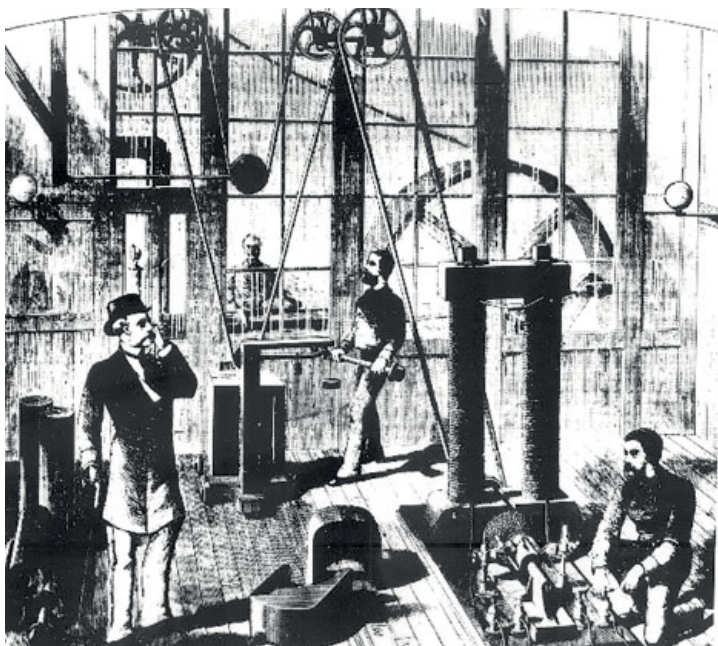
Edison indså dog, at kulbuelysene ville være uegnede som belysningskilde i almindelige beboelseshuse. Et elektrisk belysnings-system baseret på kulbuelys ville derfor kun kunne erobre mindre markedsandele fra det gassystem, der i løbet af 1800-tallet havde opnået stor udbredelse i europæiske og amerikanske storbyer, både til gadebelysning og som lyskilde i teatre, koncertsale og almindelige huse. Og det var ikke godt nok for Edison. Han besluttede at sætte alle laboratoriets ressourcer ind på at udvikle et elektrisk belysnings-system, der forhåbentligt kunne erobre en betydelig del af markedet fra det velkendte gassystem. Et system, der nok var kæmpestort, men også havde klare ulemper i form af eksplosionsfare, brandfare og lugtgener, som et elektrisk system ikke ville have.

### Edisons trumfkort

Når Edison turde gå i gang med den kolossale opgave, skyldtes det især, at han sad inde med tre trumfkort, som ingen andre opfindere i



Menlo Park-medarbejderstaben i 1879. Midt på trappen ses Edison (uden vest). Hans mest uundværlige medarbejdere omfattede finmekanikeren Charles Batchelor (den skæggede person i døråbningen) og fysikeren Francis Upton (den høje person med skæg t.h. for døren).



Det amerikanske tidsskrift *Scientific American* bragte i oktober 1879 en artikel om udviklingen af elektrisk belysning i Edisons Menlo Park-laboratorium. Tegningen viser arbejdet med at perfektionere en af de dynamoer, der skulle levere strøm til de nye glødepærer.

USA kunne matche. For det første havde han sit eget forsknings- og udviklingslaboratorium med mange af de faciliteter, han kunne tænkes at få brug for. For det andet rådede han fra starten over en medarbejderstab, der omfattede nogle af verdens bedste specialister indenfor de tekniske discipliner, han vidste ville være nødvendige for opgavens løsning. Og han var parat til at ansætte flere eksperter, efterhånden som det blev nødvendigt. Endelig,

for det tredje, havde han gode forbindelser til indflydelsesrige kredse inden for pressen, kapitalen og bystyret i New York. Alle tre trumfkort fik han brug for i løbet af de fire år, der gik, inden han kunne fremvise sit demonstrationsanlæg: et fungerende elektrisk belysnings-system i bydelen omkring Pearl Street på Manhattan.

Opgaven viste sig nemlig at være både langt større og mere besvæ-



P.S. Krøyer malede i 1903-04 "Industriens Mænd" på bestilling af Polyteknisk Læreanstalts direktør, G.A. Hagemann. Billedet, der viser 53 industrifolk forsamlet på det nyindviede Østre Elværk på Østerbro, er en hyldest til de mænd, der ifølge Hagemann står bag den moderne tids tekniske fremskridt: ingeniørerne og i ganske særlig grad elektroingeniørerne. Hagemann er den lille mand (uden hat) forrest på dampmaskinen. Foto: Det Nationalhistoriske Museum, Frederiksborg Slot.

lig, end han havde forestillet sig, da han igangsatte sit projekt. Edison mente i starten, at hans elektriske system skulle bygges op omkring lamper med lav indre modstand, men de kom aldrig til at fungere ordentligt. En af hans medarbejdere, fysikeren Francis Upton, kunne desuden vise, at energitabet i et system med lav spænding ville blive alt for stort til, at systemet kunne blive rentabelt. Altså måtte hans hold af specialister i gang med at udvikle højohmslamper og dertil svarende dynamoer. På tilsvarende måde måtte der udvikles en lang række andre komponenter, såsom lampefatninger, lysekroner, kontakter, sikringer og elmålere, der passede ind i systemet. Der skulle også indrettes et kraftværk med dynamoer, som blev drevet af dampmaskiner. Der skulle graves isolerede kabler ned under fortovene, og der skulle laves de nødvendige installationer hjemme hos de tilsluttede abonnenter.

Den 4. september 1882 var der premiere. Den dag fik de første abonnenter med tilsammen 400 lamper leveret strøm fra Pearl Street-elværket. I oktober 1883 var der over 500 abonnenter med flere end 10.000 lamper tilsluttet. De første år gav anlægget underskud, men det betød ikke så meget, for Edisons anlæg repræsenterede noget nyt og moderne. Alle byer af en vis størrelse, både i USA og Europa, ville være med på elektrificeringens vogn. Det kunne de også komme ved at købe hele anlæg eller licens af det firma, Edison General Electric, som var blevet stiftet med det formål for øje. Det betød dog ikke, at gassystemet straks blev udkonkurreret, for gaseksperterne var også i stand til løbende at forbedre deres system, for eksempel med nye og mere effektive gaslys. Kampen mellem elektricitet og gas blev lang og hård, men den blev i en årrække overskygget af kampen mellem to forskellige elektriske sy-

stemteknologier: jævnstrømssystemet og vekselstrømssystemet.

### Kampen mellem to elektriske systemer

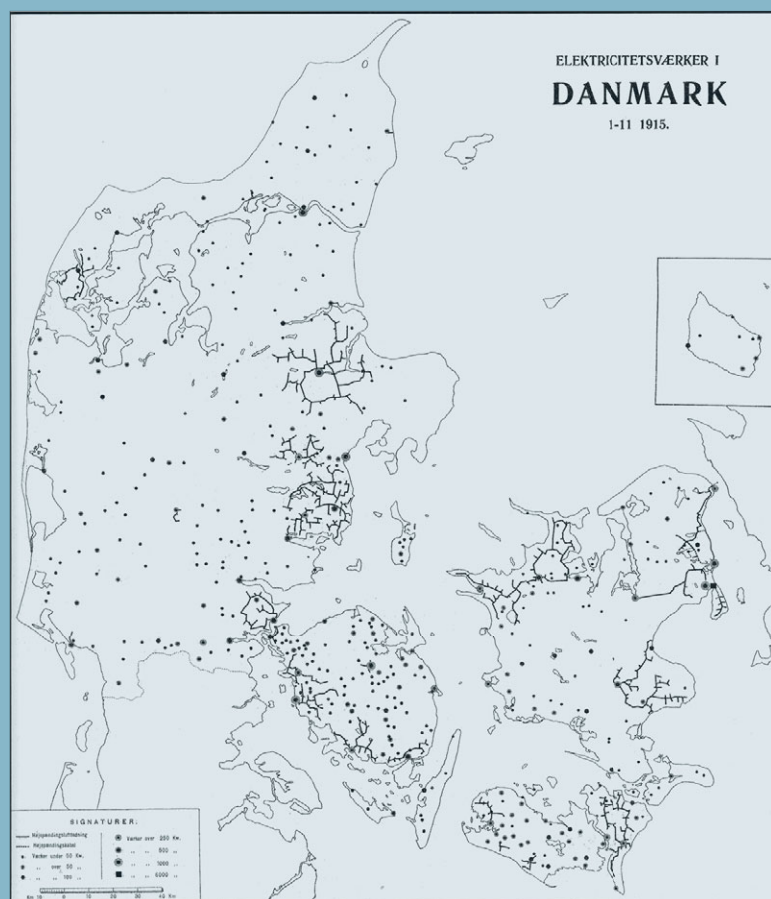
Edison svor til jævnstrøm. Hans Pearl Street-dynamoer leverede strøm med en spænding på 110 volt til abonnenterne, og det var fint, når afstanden fra elværket ud til den fjerneste forbruger kun var 1-2 km. Men økonomien ville naturligvis blive bedre, hvis værkets kapacitet kunne forøges i takt med, at man koblede abonnenter på, som boede længere væk. Det viste sig bare at være umuligt i praksis. Ligeegyldigt hvad eksperterne gjorde for at optimere Edisons system, blev det ved med at være urentabelt at sende 110 volts jævnstrøm over lange afstande. Energitabet i ledningerne var og blev for stort.

Men Edison var ikke længere alene på markedet. Allerede omkring 1885 var der opstået andre firmaer, for ek-

## Elektrificeringen af Danmark

I 1891 blev det indviet to små, private elværker i hhv. Præstø og Odense. Men det første lidt større, kommunale jævnstrøms-elværk blev indviet i 1892 i Gothersgade i København. Det blev en stor succes, og i de følgende år blev der bygget hundredvis af elværker i hele landet. Ledende elektroingeniører i København gik allerede i 1907 ind for, at man af rationelle, økonomiske grunde kun skulle bygge få store, indbyrdes forbundne vekselstrøms-elværker, men den vision blev først fuldt realiseret omkring 1960! En væsentlig grund til dette var den succesfulde danske andelsbevægelses ønske om at sikre andelshaverne i de små lokalsamfund medejerskab af elforsyningsanlæg analogt til deres medejerskab af mejerier og brugsforeninger.

Som det ses af figuren, bestod det danske elsystem i 1915 derfor af en masse små elværker, hvoraf nogle leverede jævnstrøm, andre vekselstrøm til forbrugere i den nære omegn. Derudover var der ved at vokse større vekselstrøms-ellet frem omkring København, Randers og Aarhus/Odder, men der gik mere end 40 år, inden de kom til at omfatte hele Danmark.



sempel Westinghouse, der tilbød at levere vekselstrømsanlæg, som ikke havde det afstandsproblem, Edisons jævnstrømsanlæg var plaget af. Ved hjælp af en nyopfundet, effektiv transformator kunne Westinghouse transformere en vekselstrøm med lav spænding (for eksempel 110 eller 220 volt) og stor strømstyrke om til en vekselstrøm med høj spænding (for eksempel 10.000 volt) og lille strømstyrke, der med et meget begrænset tab kunne transporteres over store afstande til en lokalitet med et stort elektricitetsbehov. Når den højspændte vekselstrøm her blev transformeret ned igen, kunne den fordeles til de enkelte forbrugere i omegnen via komponenter, der næsten svarede til Edisons.

Det blev indledningen til en lang og hård kamp mellem de to systemer. Edison hævdede, at vekselstrøm var farligt, og han ville under ingen omstændigheder være med til at ændre noget afgørende ved sit

jævnstrømsystem. Men i løbet af få år havde Edisons firma i den grad fået kniven på struben, at andre måtte tage over. Den nye, stærke mand i selskabet blev finansmanden J.P. Morgan, der i 1892 fik gennemtrumfet, at Edisons firma blev fusioneret med et andet firma (Thomson-Houston), der sad på mange vigtige vekselstrømspatenter. Den nye gigant fik navnet General Electric, et klart vidnesbyrd om, at Edison ikke spillede nogen innovativ rolle i dette firma, der fremover ville få brug for eksperter af en anden type.

General Electric måtte nu indstille sig på at udvikle vekselstrømsteknologi, der kunne matche Westinghouses. Men derudover gjaldt det om at få den nye teknologi til at spille sammen med jævnstrømsteknologien, for på det område havde firmaet jo stor ekspertise samt enorm kapital bundet i hundredvis af lokale jævnstrømsanlæg. Det lykkedes,

hvilket betød, at kampen mellem systemerne stort set blev aflyst fra midten af 1890'erne. Fra dette tidspunkt kunne både General Electric og Westinghouse (og eksempelvis Siemens i Europa) levere elektricitetsanlæg af den type, kunderne ønskede. Først efter yderligere 50-60 år, dvs. efter anden verdenskrig, kan man sige, at vekselstrøm, transporteret over enorme afstande via højspændingsnettet, havde sejret i den lange kamp mellem de to elektriske systemer.

I dag er så godt som alle europæiske landes elværker forbundne via højspændingsnettet. Systemet er uhyre komplekst, men også meget robust. For sker der et nedbrud et sted, kan den manglende elektriske energi herfra næsten altid kompenseres af ekstra bidrag fra elværker andre steder i systemet. Nøgleordene er "næsten altid". Vi kan derfor kun håbe, at indledningens mareridtsscenario aldrig bliver til virkelighed. ■

**Ydere læsning:**  
Keld Nielsen, Henry Nielsen og Hans Siggaard Jensen, *Skruen uden ende - Den vestlige teknologiske historie*, 3. udgave. Nyt Teknisk Forlag 2005.

Birgitte Wistoft, Flemming Petersen og Harriet M. Hansen, *Elektricitetsens århundrede*, bd. 1-2. Danske Elværkers Forening 1991-92.

Henry Nielsen og Birgitte Wistoft, *Industriens Mænd. Et Krøyer-maleris tilblivelse og industrihistoriske betydning*. Forlaget Klim 1996.

# DEN GRØNNE OMSTILLING OG EL-NETTET

Forudsætningen for en grøn omstilling baseret på vind- og solenergi er, at man kan få den producerede elektricitet pålideligt og sikkert ind på el-nettet. I praksis er det en udfordrende opgave, som kræver præcis styring af såkaldt effektelektronik.

## Forfatterne



Mads Graungaard Taul er postdoc og forsker i pålidelig og stabil net-tilslutning af vedvarende energikilder og effektelektroniske omformere. mkg@et.aau.dk



Frede Blaabjerg er professor og forsker i at sikre et fremtidigt bæredygtigt samfund i en overvejende fuldt elektrificeret verden ved brug af effektelektronik både i produktion, transmission, distribution og forbrug af energien. fbl@et.aau.dk

Begge ved Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet

**I**Danmark har vi en markant ambition om at nedbringe CO<sub>2</sub>-udledningen med 70 % allerede i 2030, og i 2050 forventes det, at vi er helt neutrale. En meget vigtig brik i realiseringen af denne ambition er, at vi elektrificerer vores samfund langt mere end, det er i dag.

Groft sagt kan energiforbruget i Danmark deles i tre kategorier: en til varme, en til transport og en til elektricitet. Energiforbruget til varme og transport baserer sig meget på fossile brændsler, og det skal vi derfor ændre til at basere sig på andre energikilder. Sol og vind er nogle af de mest oplagte, da de kan udnyttes til at producere el uden at udlede CO<sub>2</sub>. I de seneste årtier er teknologiudviklingen for disse gået hastigt fremad, og indenfor de seneste 5 år er både vind- og solenergi blevet billigere end konventionelle ressourcer som kul og olie – hvorfor de to teknologier er blevet meget attraktive at bruge globalt.

Der er i dag installeret mere end 1100 GW vind- og solenergi i verden (svarende til 14% af verdens totale el-kapacitet), og tallet stiger

betydeligt hvert år med nye installationer. Også i Danmark forventes en stor tilvækst i installeret effekt for både sol og vind. Graden af succes i implementeringen vil afhænge af, om tilslutningen til el-nettet foregår forsvarligt, og om el-nettet er i stand til at håndtere så store mængder tilsluttet el-kapacitet. El-nettet er etableret ved en trefaset vekselspænding, der er defineret ved en amplitude, en faseforskydning og en frekvens (se boks). Det betyder, at vi kan bruge elektromagnetiske transformere til at transformere spændingen op og ned på el-nettet alt efter behov. Ørsteds opdagelse

af elektromagnetismen for 200 år siden er helt afgørende for, at dette kan lade sig gøre.

## Når effekten skal ind på el-nettet

Størstedelen af vores elektricitet er i dag produceret af store synkron-generatorer på kraftværkerne. En synkrongenerator er en generator, der er drevet af en turbine (for eksempel kul, vand, biomasse, gas, olie mm.), hvorefter den mekaniske energi på rotorakslen bliver konverteret til elektrisk energi ved brug af elektromagnetisme. Generatoren roterer med en konstant hastighed,

## Hvad er 3-faset spænding?

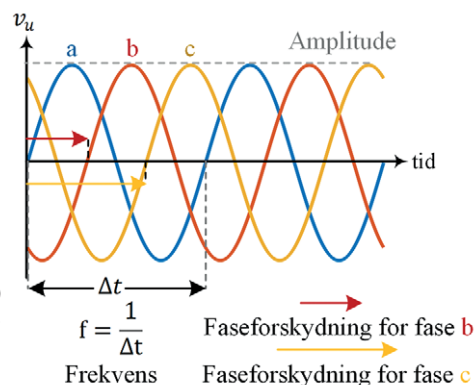
### Amplituden

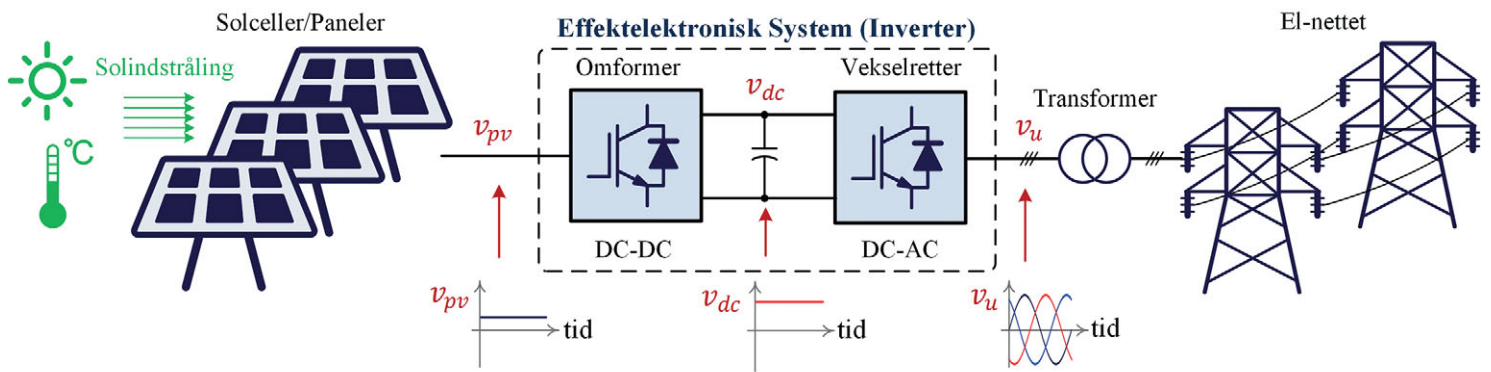
beskriver det maksimale udsving af sinuskurven.

### Frekvensen

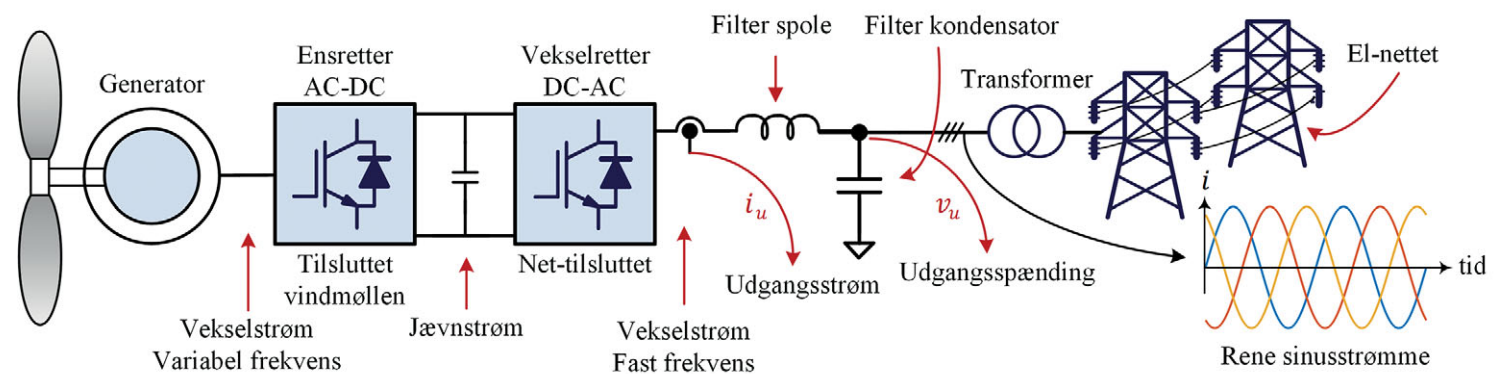
beskriver hvor mange gange i sekundet sinuskurven gentager sig selv, 50 Hz i Danmark.

**Fasen** (faseforskydningen) af en sinuskurve beskriver, hvor meget signalet er forskubbet til højre eller venstre





Solcelle-system tilsluttet el-nettet via effektelektroniske omformere. Solcellerne leverer jævnspænding når solens stråler rammer cellerne. Denne jævnspænding (DC) er forøget ved brug af en DC-DC omformer. Herefter, vekselrettes jævnspændingen til en tre-faset vekselspænding, hvormed der kan leveres energi ind på el-nettet.



Skitse af det elektriske system for en moderne vindmølle, der er tilsluttet el-nettet. Effektelektronikken er et væsentligt element.

nemlig netfrekvensen (heraf navnet synkron), og der leveres effekt ind på el-nettet ved at etablere en stærk tre-faset vekselspænding.

I lighed med synkrogeneratoren er samtlige generatorer i vindmøller også drevet elektromagnetisk for at kunne omdanne vindens energi til mekanisk rotation og herefter til elektricitet.

Solcelle-systemer er derimod ikke baseret på en elektromagnetisk generator, men i stedet på siliciumbaseret halvleder-teknologi, der kan omdanne solens stråler til jævnspænding (DC). For at kunne slutte denne spænding til el-nettet må den derfor omformes til vekselspænding (AC), hvilket gøres ved brug af en såkaldt vekselretter, der består af effektelektroniske komponenter, herunder transistorer.

Den jævnspænding, der genereres fra solcelle-panelerne, afhænger af intensiteten af solens stråler

og panelernes temperatur. Derfor er det typisk nødvendigt at forøge jævnspændingen via en jævnspænding-til-jævnspændings-omformer (DC-DC), da jævnspændingen skal være højere end el-nettets maksimale spænding for at transportere energien ind i el-nettet. Og når jævnspændingen omformes til vekselstrøm (DC-AC) er det endvidere vigtigt, at DC-AC-omformningen er synkroniseret med el-nettet (det vil sige, at frekvens og fase på udgangsspændinger og omformerspændinger er ens), da der ellers vil løbe en stor og ukontrolleret strøm imellem el-nettet og solcellesystemets vekselretter, hvilket kan beskadige systemet.

### Moderne vindmøller og el-nettet

I moderne vindmøller benyttes også effektelektroniske omformere til at dirigere energien udvundet fra vinden ind i el-nettet. For en net-tilsluttet, effektelektronisk omformer er den primære opgave at sikre, at

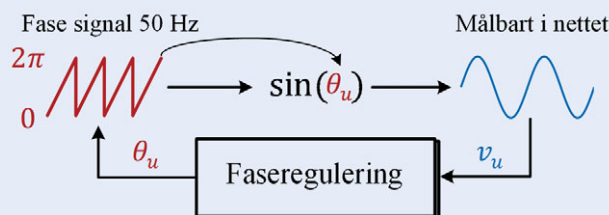
energien optaget i vindmøllens roterende elementer bliver leveret pålideligt og stabilt ind i el-nettet. For at det kan lykkes, skal den strøm, der sendes fra vindmøllen ind i el-nettet, have en præcis amplitude, fase og frekvens (typisk 50 Hz i Danmark og Europa).

For at optimere udbyttet fra vindmøllen drives vindmølle-generatoren med en variabel frekvens afhængig af vindhastigheden. Denne strøm med variabel frekvens ensrettes herefter til en jævnstrøm, hvorefter den nettilsluttede vekselretter omformer jævnstrømmen til vekselstrøm med en fast frekvens, nemlig netfrekvensen (typisk 50 Hz). For at sikre, at rene sinusformede strømme leveres til nettet, bruges en elektromagnetisk filter-spole og -kondensator til at udglatte strøm og spænding.

I moderne vindmøller er styring og stabilitet af den net-tilsluttede vekselretter altafgørende for, at

## Faseregulering og synkronisering af en vindmølle med el-nettet

For at indsende sinusformede strømme på el-nettet, er det nødvendigt at kende frekvens og fase af net-spændingen, og disse bestemmes ved hjælp af faseregulering. Den faseregulering, der foregår i styringen af en vindmølle, kan beskrives visuelt med sinusbølger og vektorer. Hvis et 50 Hz fasesignal, som vist i rødt, indsættes i en sinusfunktion, så vil man erfare, at resultatet er en 50 Hz sinusbølge, som anvist med blå til højre. Dette er en intuitiv matematisk proces. For en vindmøllestyring er det derimod af interesse at gå den modsatte vej, altså bestemme fasesignalet ud fra den blå sinusbølge, som bliver målt som en spænding i el-nettet. Det er denne proces, der kaldes faseregulering eller synkroniseringskontrol. Den fundne synkroniserings-



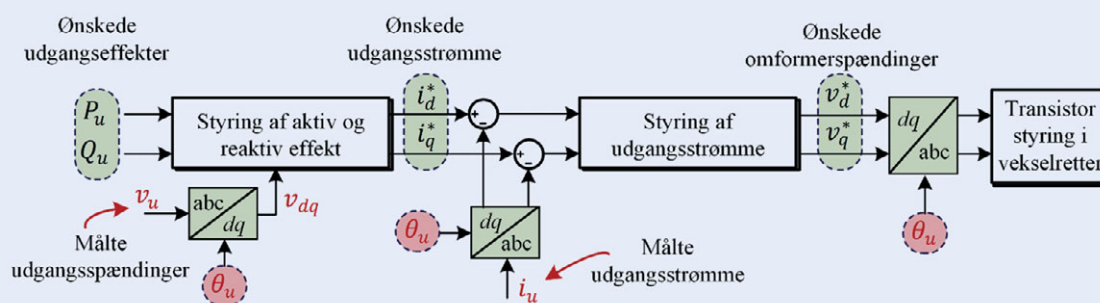
fase ( $\theta_u$ ) bruges herefter til at beskrive hele vindmøllestyringen relativt til den målte netspænding, så de indsendte strømme kan synkroniseres med spændingen i el-nettet.

Frede Blaabjerg er blandt pionerne indenfor udvikling af faseregulering som metode til at sikre en robust tilslutning af vedvarende energikilder på el-nettet.

## Hvorfor er fasesynkronisering vigtigt for stabil vindmøllestyring?

En typisk kontrolstruktur for styring af net-tilsluttede omformere starter med en reference, hvor ønskede udgangseffekter er specificeret baseret på vindmøllens omdrejningshastighed mm. Ud fra disse referencer bruges den målte netspænding samt synkroniseringsfasen opnået fra fasereguleringen til at bestemme de ønskede udgangsstrømme, der skal skabes af den net-tilsluttede

vekselretter. Disse ønskede udgangsstrømme er realiseret ved brug af en strøm- og transistorstyring. Hvad der er afgørende at forstå for denne styringsmetode, er, at alle ønskede værdier og målte værdier er direkte skabt via den fundne synkroniseringsfase,  $\theta_u$ . Det er derfor, det er så vigtigt at bestemme denne fase korrekt, for ellers kan hele vindmøllens styring blive ustabil.



Typisk struktur for styring af en net-tilsluttet vekselretter i moderne vindmøller. De ønskede udgangseffekter benyttes på baggrund af fasereguleringen til at styre den net-tilsluttede omformer som ønsket. Kasserne med abc/dq repræsenterer en transformation fra tre-faset målte strømme og spændinger til styringssignaler, som er beskrevet relativt til synkroniseringsfasen  $\theta_u$ . Hvis styringssignalerne skal virke optimalt, skal synkroniseringsfasen være korrekt bestemt.

vindmøllerne kan indfri deres fulde potentiale.

### Synkronisering og styring med el-nettet

At styre vekselretteren i en moderne vindmølle er en krævende opgave. Målet er at sørge for, at vekselretterens udgangsspænding er synkroniseret med de sinusformede spændinger, der er i el-nettet. For at dette kan lade sig gøre, er det nødvendigt at kende fasen og frekvensen på spændingen i el-net-

tet. Men det er ikke bare noget, man kan slå op i en tabel, som man måske kunne tro. Disse parametre er dynamiske og ændrer sig afhængig af den øjeblikkelige tilstand af el-nettet. Det er derfor nødvendigt, at man hele tiden holder øje med ændringer i frekvens og fase for at sikre, at vindmøllen leverer strøm ind i el-nettet på en stabil og pålidelig måde.

For at opnå viden omkring disse parametre bruger man typisk en stra-

tegi kaldet faseregulering. Denne strategi går ud på at beregne fasen og frekvensen ud fra en løbende måling af spændingen i elnettet (se boks), hvilket man derefter bruger som udgangspunkt for at beskrive hele vindmøllestyringen relativt til den målte netspænding. Det er en kritisk operation, idet kvaliteten af den strøm, vindmøllen leverer ind på el-nettet, stærkt afhænger af, om man har bestemt fasen i elnettet korrekt. Hvis ikke fasen bliver bestemt korrekt, kan hele vindmøl-

lens styring blive ustabil, og det kan forårsage ufrivillig nedlukning af vindmøllen, tab af produceret vedvarende energi og i værste fald strømafbrydelser i el-nettet. Disse problemstillinger er blandt dem vi på Institut for Energiteknik arbejder målrettet på at finde gode løsninger til i fremtidens el-net. Således har vi eksempelvis bidraget med matematiske modeller, som kan beskrive de ustabiliteter der kan opstå i fasereguleringen, og vi har udviklet metoder, som gør vindmøllestyringen mere robust overfor kortslutningsfejl.

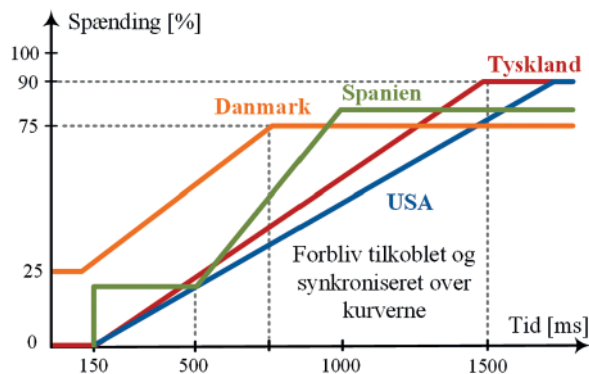
### Udfordringer med styringer mod el-nettet

Den elektriske energi er på mange måder fordelagtig og derfor også en velvalgt energibærer i fremtidens energisystem. Elektricitet er effektivt at transportere, den er nem at skalere, og den kan nemt transformeres op og ned. Elektrisk energi har dog den klare ulempe, at hvis et el-system altid skal fungere som ønsket, er der nødt til at være balance imellem produceret og forbrugt effekt. Det bliver en udfordring i fremtidens el-system baseret på vedvarende energikilder, da sol og vind er vejrafhængige, og der skal derfor indgå elementer til energilagring i fremtidens energisystem. Denne nødvendige balance betyder også, at vindmøllernes synkronisering med nettet er særdeles vigtig, da driften af el-nettet forudsætter, at der altid er effekt-produktion.

Ukorrekt eller forvrænget bestemmelse af synkroniseringsfasen kan ofte ske under to af følgende scenarier:

1) Når vindmøllen er tilkoblet el-nettet igennem en stor elektrisk impedans (modstand). Eksempler på dette er store havmølleparker, som er placeret geografisk langt fra det primære el-net.

2) Når netspændingen er lav. En lav netspænding forekommer især under netfejl som ved kortslutninger og lynnedslag.



Tilslutningskrav for vindmøller i forskellige lande i tilfælde, hvor el-nettet er udsat for fejl med lave spændinger. Så længe spændingen holder sig over de viste kurver, skal vindmøllerne forblive tilkoblet og synkroniseret til el-nettet.

Da kortslutninger og lynnedslag må forventes med jævne mellemrum og flere og flere effektelektronik-baserede vindmøller bliver tilkoblet el-nettet igennem lange elektriske kabler med en høj impedans, er det desværre umuligt at opnå en 100% stabil synkroniseringskontrol i vindmøllen. Men for at minimere ustabiliteter er det vigtigt at sikre, at synkroniserings-enhederne er så robuste som muligt. Dette forhold er reguleret via nettilslutningskrav fra elselskaberne, hvor et af kravene er, at vindmøllerne (og også solcelle-anlæg) skal forblive tilsluttet el-nettet selv om spændingen er 0 eller er meget reduceret i en kort periode (se figur). Hvis spændingen derimod falder til under 25% i en længere periode (i Danmark over 150 ms), har man lov til at koble vindmøllerne fra el-nettet, indtil spændingen returnerer. Når spændingen returnerer efter en fejl, skal omformerne øjeblikkeligt være i stand til at synkronisere med det tilbagevendende el-net.

Fasereguleringen og styringen af vindmøllen er derfor nødt til at kunne håndtere sådanne situationer – ellers vil man ikke få lov til at slutte sol- og vind-energi til el-nettet.

### Det bliver stadig mere kompliceret i fremtiden

Artiklen her har givet et lille indblik i nogle af de udfordringer, der er ved fremtidens el-net baseret på sol- og vindenergi – som også forskningsmæssigt er spændende at være med til at løse. Fremtidens el-net

vil bestå af titusinder af effektelektroniske enheder (vindmøller, solcelle-systemer, smarte laster mm.), der alle skal synkroniseres med et el-net, der tidligere har baseret sig på få store synkron-generatorer til at etablere en stærk sinusformet spænding i nettet. På grund af ønsket om en grøn omstilling, vil disse store generatorer sandsynligvis forsvinde i takt med, at kraftværker baseret på fossile brændsler bliver udfaset. Det store spørgsmål er nu, hvilke af de titusinder enheder, der skal bestemme spænding og frekvens, når de store generatorer ikke er der mere. Det kan betyde, at fremtidens effektomformere skal fungere på en anden måde, end de gør i dag – måske ligesom synkron-generatorer gør. Synkron-generatorer behøver nemlig ikke at synkroniseres til en stærk tre-faset spænding som eksempelvis vindmøller skal. Synkron-generatorer kan istedet selv etablere en stærk og robust net-spænding, hvor synkronisering med det øvrige el-net er meget pålidelig. En sådan løsning ved brug af effektomformere kaldes en virtuel synkron-generator, da teknologien bag dette udelukkende er baseret på effektelektronik og digital styring. Om en sådan teknologi vil være løsningen på udfordringerne for fremtidens el-net, er dog endnu usikkert. Hvad der derimod er sikkert, er, at vi forskere vil arbejde intenst på at finde gode løsninger på styringen af fremtidens el-net og på den måde være med til at løfte arven fra Ørstedes opdagelse for 200 år siden. ■

Forskningen bag problemstillingerne omtalt i denne artikel er finansieret af Villum Fonden og REPEPS (RELIABLE Power Electronics-based Power System) projektet på Aalborg Universitets Institut for Energiteknik.

### Videre læsning:

- F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang and X. Wang, "Distributed Power-Generation Systems and Protection," in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 7, pp. 1311-1331, July 2017.
- X. Wang, M. G. Taul, H. Wu, Y. Liao, L. Harnefors, F. Blaabjerg, "Grid-Synchronization Stability of Converter-Based Resources – An Overview," in IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020.
- M. G. Taul, X. Wang, P. Davari and F. Blaabjerg, "An Overview of Assessment Methods for Synchronization Stability of Grid-Connected Converters Under Severe Symmetrical Grid Faults," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 9655-9670, Oct. 2019.
- J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012.
- R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1323-1332, Sept. 2004.



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 Uddannelsesstjek
- Deltage i Åbent Hus i uge 9
- Blive studerende for en dag
- Se film om uddannelserne

Læs mere om vores uddannelser  
og dine muligheder på

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

 Læs på SCIENCE

 @scienceku



# NOTATION OG REPRÆSENTATIONERS BETYDNING FOR MATEMATIK

Notation, og det at have en velegnet repræsentation af et matematisk problem, spiller en afgørende rolle for håndteringen og udviklingen af matematik. Her vises nogle illustrerende eksempler på hvordan.

Der er en ofte fortalt historie om den berømte matematiker Gauss, der som ung skoledreng blev stillet et – troede hans lærer – svært problem, der skulle holde ham beskæftiget i noget tid. Læreren satte ham til at lægge alle tal fra 1 til 100 sammen. Desværre virkede det ikke: Gauss klarede opgaven på ganske kort tid, da han fandt en smart måde at opstille problemet:

$$\begin{array}{r} 1+ \quad 2+ \quad 3+ \dots \quad +50 \\ 100+99+ \dots \quad + 51 \\ \hline 101+101+ \dots \quad +101 \end{array}$$

Ovenstående overbeviste Gauss om, at summen var 50 gange 101, som er lig 5050.

Generelt spiller det en stor rolle, når man laver matematik, at man har noget notation eller en velegnet repræsentation – noget der også er blevet bemærket af mange matematikere igennem tiden. Leibniz, som var meget optaget af at producere en velegnet (matematisk og logisk) notation, skrev for eksempel i 1677:

*Spørg dig selv om du kan udføre nogen aritmetiske beregninger overhovedet uden at gøre brug af tal-symboler*



Raphaels fresko "Skolen i Athen" i Vatikanpaladset i Rom, malet 1509-1511, viser en perlerække af antikkens filosoffer, heriblandt Pythagoras, som ses nederst til venstre (skrivende i en bog). Pythagoras grundlagde et broderskab eller religiøst fællesskab, kaldet pythagoræerne, der fulgte hans lære. Den første koloni lå i den græske koloni Kroton i Syditalien (i dag Crotona).

At regne med tal kræver en eller anden form for talsymboler. Det har vist sig, at vores talsystem, det arabiske 10-talssystem, er særdeles velegnet til både at repræsentere tallene og regne med dem. De fleste ville nok i dag gribe fat i en lommeregner, hvis der skal laves større beregninger – men bemærk, at udregningen stadig kræver en bestemt repræsentation af tallene: det vil nok være en større udfordring for de fleste at lægge

eller gange de to tal "to tusinde femhundrede og otteogtyve" og "nitusinde trehundrede og sytten" sammen uden først at oversætte dem til talsymboler i vores talsystem.

En god måde at repræsentere et problem på kan desuden være afgørende for løsningen af det. Endvidere er det nogle gange en fordel at benytte sig af figurer, eller visuelle repræsentationer, når man vil løse

## Om forfatteren



Jessica Carter er lektor ved Institut for Matematik og Datalogi, Syddansk Universitet. Hendes forskning kombinerer matematikens videnskabsteori og historie. Hun interesserer sig blandt andet for, hvordan repræsentationer, herunder diagrammer, bidrager til udviklingen af ny matematik. [jessica@imada.sdu.dk](mailto:jessica@imada.sdu.dk)

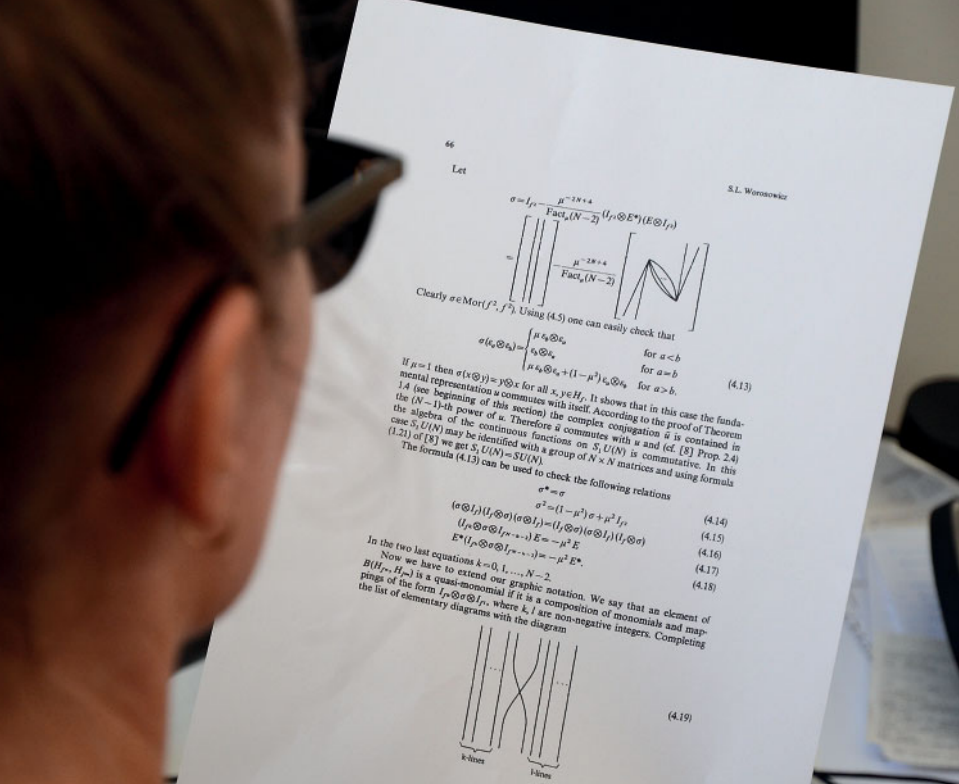
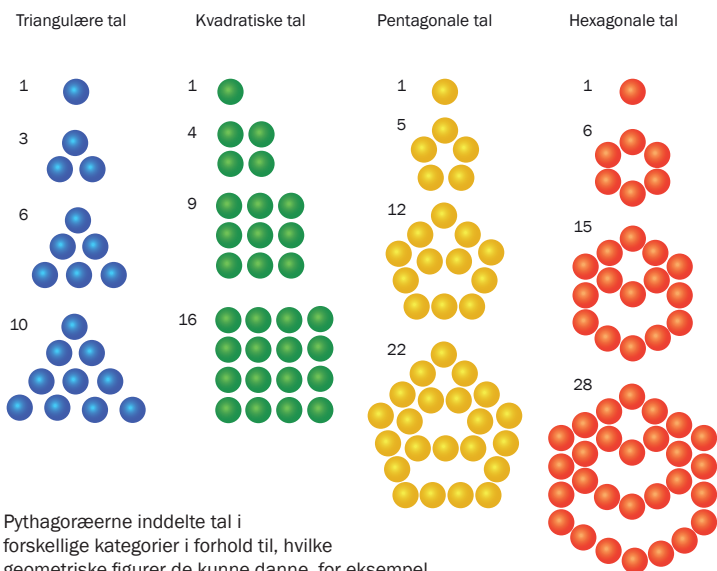


Foto: Carsten R. Kjaer

Repræsentationer og notation er et kendetegn for matematikken og spiller en afgørende rolle for, hvad vi kan se og gøre i matematik.



et problem. Et eksempel, som vi betragter nedenfor, er at finde heltals-tripler, som opfylder Pythagoras sætning, dvs. at finde heltal  $a$ ,  $b$ ,  $c$  så  $a^2 + b^2 = c^2$ .

Det skal understreges her, at jeg hermed ikke påstår, at figurer generelt kan bruges til at bevise udsagn i matematik. Jeg taler om, at resultater kan opdaget eller anskueliggøres ved hjælp af visuelle repræsentationer. Her vil jeg især fokusere på, hvordan notation og forskellige måder at repræsentere

problemer på, inklusive som diagrammer, hjælper os til at opdage sammenhænge, og at de kan bidrage til at *anskueliggøre* disse.

I denne artikel vil jeg således give nogle konkrete eksempler på, hvordan repræsentationer og notation spiller en rolle for, hvad vi kan se og gøre i matematik. Overordnet kan man tale om, at notation eller en bestemt repræsentation på den ene side har potentiale til at vise forskellige aspekter ved et matematisk

begreb og på den anden side give mulighed for forskellige manipulationer (svarende til en udledning af egenskaber hos begrebet). Jeg vil her vise eksempler på, hvordan en geometrisk repræsentation kan give anledning til ny indsigt og omvendt, hvordan algebraisk notation har bidraget til en løsning af problemer.

### Manipulation af repræsentationer

Det meste af matematisk problem-løsning og ræsonnement kræver, at man gør brug af en eller anden form for matematisk notation. Som et simpelt eksempel kan vi betragte begreberne "lige" og "ulige tal". Hvis jeg vil bevise sætninger om disse, er det en fordel at udtrykke dem på en måde, der afspejler deres matematiske egenskaber eller struktur. Det er karakteristisk for et lige tal, at det er deleligt med 2, hvorfor vi kan skrive et vilkårligt lige tal,  $n$ , på formen  $n = 2 \cdot k$  for et naturligt tal  $k$ . (Tilsvarende kan et ulige tal skrives som  $n = 2 \cdot k + 1$ .) Udstyret med denne repræsentation, kan vi udlede forskellige sætninger. For eksempel at *kvadratet på et lige tal er lige*: Vi repræsenterer et lige tal,  $n$ , som før:  $n = 2k$ . Vi kvadrerer dette, og benytter nogle algebraiske regneregler (hvilket svarer til, at vi manipulerer den givne repræsentation):

$$n^2 = (2k)^2 = 4 \cdot k^2 = 2 \cdot 2k^2$$

Vi observerer, at det sidste udtryk igen er på formen  $2m$  for et naturligt tal  $m$  (som er  $2k^2$ ), og at det derfor er lige. Tilsvarende beregning på  $n = 2 \cdot k + 1$  kan udføres for at konstatere, at kvadratet på et ulige tal er ulige.

### Repræsentation som opdagelsesværktøj

Pythagoras' sætning angiver en relation mellem siderne i en retvinklet trekant, at *kvadratet på hypotenusen er lig summen af kvadraterne på kateterne*. Hvis disse sider betegnes henholdsvis,  $c$ ,  $a$  og  $b$  kan sætningen skrives:  $c^2 = a^2 + b^2$ . Det er uvist, hvem der først beviste denne sammenhæng. Der findes et utal

af argumenter for sammenhængen, nogle er rent visuelle, mens andre kombinerer geometriske og algebraiske argumenter. Det er ikke bevist for Pythagoras' sætning, vi skal se på her. Jeg har i stedet valgt at illustrere et andet problem i relation til sætningen. Det er velkendt, at der findes forskellige heltals-tripler, som opfylder relationen. For eksempel kan tallene 3, 4 og 5 indsættes:  $3^2 + 4^2 = 5^2$ . Spørgsmålet er, hvordan man finder frem til disse tripler?

En repræsentationsform, som Pythagoræerne brugte, kan benyttes til at finde heltalsløsninger. "Pythagoræerne" refererer til følgerne af Pythagoras (ca. 572-497 f. Kr.), som dannede en skole ved Croton i det nuværende Italiens sydspids. De repræsenterede tal ved at placere småsten i mønstre i form af forskellige geometriske figurer og blev hermed i stand til at formulere forskellige sammenhænge. Ét eksempel er en repræsentation af tal som *kvadrattal*.

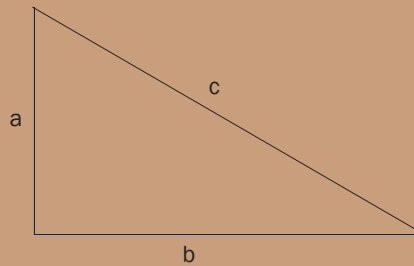
I figur 2 i faktaboksen ses, at et kvadrattal kan opdeles i et "indre kvadrat" samt en rest, der tilsammen kan udtrykkes som  $(n + 1)^2 = n^2 + (2n + 1)$ . Dette minder om Pythagoras' sætning – hvis bare  $2n+1$  svarer til et kvadrattal. Vi kan derfor lede efter kvadrattal, som er ulige tal, for derefter at bestemme hvad "n" svarer til. Man kan vise, at ulige kvadrattal præcis svarer til kvadratet på ulige tal. Vi har derfor en systematisk måde at lede efter tripler: Vi kan forsøge os med det første ulige tal, 3, som kvadreret giver  $9 = 2 \cdot 4 + 1$ . Det giver  $n = 4$  og  $n+1 = 5$ . Det giver os triplet (3, 4, 5). Næste ulige tal er 5, som giver  $n = 12$ , og  $n+1 = 13$ , og følgende heltalsløsning (5, 12, 13). Forklaring og yderligere heltalstripler findes i den tilhørende faktaboks.

### Notation bidrager til at sammenhænge bliver synlige

Eksemplet før illustrerer, hvorledes en geometrisk repræsentation kan frembringe struktur; i det konkrete

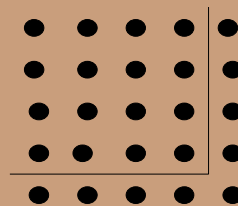
## Pythagoræiske tripler

Pythagoras' sætning siger om en retvinklet trekant med sider a, b og c placeret som i figuren, at  $c^2 = a^2 + b^2$ .



Figur 1

For at bestemme heltalsløsninger til denne ligning betragter vi en repræsentation, som formentlig er benyttet af Pythagoræerne. Betragt figuren nedenfor. Det er tydeligt, at den har form som et kvadrat, og antallet af prikker kan derfor beregnes som kvadratet på siden.



Figur 2

I den viste figur indeholder siden 5 prikker og kvadratet derfor i alt  $5 \cdot 5 = 25$ . Vi kan også opsplitte kvadratet som vist i figuren, hvor det er lig summen af det indre kvadrat og den ydre figur, som kaldes et gnomon. Det ses, at det indre kvadrat har side én mindre end det store, og at der er dobbelt så mange prikker i gnomonet som siden i det lille kvadrat plus én, altså  $2 \cdot 4 + 1$ . Hvis vi nu forestiller os, at vi har en lignende figur med et vilkårligt antal prikker, et kvadrat sammensat af et indre kvadrat med  $n \cdot n = n^2$  prikker og det ydre gnomon lig  $2 \cdot n + 1$  og det ydre kvadrat med  $(n + 1) \cdot (n + 1) = (n + 1)^2$  prikker, opnår vi følgende generelle udtryk:

$$n^2 + (2 \cdot n + 1) = (n + 1)^2$$

Dette har ikke helt form som Pythagoras' sætning – men hvis leddet  $2 \cdot n + 1$  er kvadratet på et tal, så har vi jo netop en sum af to kvadrattal, som er lig et tredje. Af formen,  $2 \cdot n + 1$ , ses, at tallene må være ulige, så vi kan lede efter ulige kvadrattal. De første af disse er 9, 25, 49 og 81. Hvis vi ser på tallet 25, så kan det skrives  $25 = 2 \cdot 12 + 1$ , hvilket giver  $n=12$ . Nu har vi således tallene, der kvadreret giver, hvad der svarer til  $2 \cdot n + 1$  og  $n^2$  fra ligningen ovenfor. Det sidste, der mangler er  $n + 1$ , som her bliver 13. Vi får derfor triplet (5, 12, 13). Kvadratet på 7 er 49, som vi kan skrive som  $2 \cdot 24 + 1$ . Så her bliver n lig 24 og  $n + 1$  giver 25 og dermed får vi triplet (7, 24, 25). Den sidste værdi for n er 40, hvilket giver triplet (9, 40, 41).

Ved at forsøge sig med andre opdelinger af kvadratet i et mindre kvadrat og en anden figur, kan der opnås flere heltalstripler. Hvis læseren i stedet for ovenstående opdeling forsøger sig med at skære to prikker fra i det ydre gnomon, kan man for eksempel opnå heltalsløsningen (6, 8, 10).

tilfælde, hvordan et kvadrat kan splittes op i mindre kvadrater. I dette afsnit ser vi, hvordan ny (algebraisk) notation kan være medvirkende til, at vi kan få øje på sammenhænge, som tidligere har været umulige

at se. For at illustrere dette giver jeg et eksempel fra overgangen fra geometri til analytisk geometri, som var medvirkende til, at franskmanden René Descartes kunne formulere en formodning om, hvorfor de

## De Klassiske Problemer

De klassiske problemer blev formuleret, og forsøgt løst i det antikke Grækenland. Forudsætningen for løsningen var, at den udelukkende måtte benytte sig af en passer og en lineal (uden måleenhed). De tre problemer er følgende:

*Fordobling af terningen.* Givet en terning med et vist rumfang, konstruér siden i den terning, som har det dobbelte rumfang.

*Vinklens tredeling* siger, at man givet en vilkårlig vinkel skal kunne konstruere en vinkel med en tredjedel af dens størrelse.

*Cirkelns kvadratur* kræver, at man, givet en vilkårlig cirkel, skal kunne konstruere et kvadrat med samme areal.

Problemerne blev oprindeligt formuleret fra omkring midten af det 5. århundrede f.Kr. En af de første, som arbejdede med terningens fordobling og cirkelns kvadratur, var Hippocrates fra Chios. De to første problemer er formentlig inspireret af, at lignende, simple problemer kunne løses. Det er muligt både at halvere en vinkel og at bestemme siden i et kvadrat, som fordobler arealet af et givet kvadrat. Sidstnævnte problem indgår i en af Platons dialoger, Menon, som del af en illustration af, hvorledes vi erkender matematiske sandheder. Cirkelns kvadratur beskriver en generel søgen efter en måde at beregne arealet af en cirkel.

Hippocrates fandt ud af, at fordoblingen af terningen kunne løses, hvis man kunne finde "to tilhørende mellemproportionaler" – med andre ord, givet to tal  $a$  og  $b$ , skal der bestemmes to andre,  $x$  og  $y$ , så

$$\frac{a}{x} = \frac{x}{y} = \frac{y}{b}$$

Vi kan først konstatere, at hvis vi har en terning med side  $a$  og dermed rumfang  $a^3$  skal der bestemmes en side  $x$  (i den nye terning), som opfylder, at  $2a^3 = x^3$ . Hvis vi nu antager, at vi kan løse problemet med at bestemme mellemproportionaler, svarer ovenstående til, at vi skal bestemme mellemproportionaler for  $a$  og  $2 \cdot a$ . Med andre ord, skal vi finde  $x$  og  $y$ , så

$$\frac{a}{x} = \frac{x}{y} = \frac{y}{2a}$$

$x$ 'et i denne giver den eftersøgte løsning. Vi regner først på  $\left(\frac{a}{x}\right)^3$ :

$$\left(\frac{a}{x}\right)^3 = \frac{a}{x} \cdot \frac{a}{x} \cdot \frac{a}{x} = \frac{a}{x} \cdot \frac{x}{y} \cdot \frac{y}{2a}$$

I det midterste udtryk udnyttes i den anden faktor, at  $\frac{a}{x} = \frac{x}{y}$  og i den sidste faktor, at  $\frac{a}{x} = \frac{y}{2a}$ .

Det indses herefter, at  $x$ ,  $y$  og  $a$  kan forkortes væk, da de alle optræder én gang både i tæller og i nævner:

$$\left(\frac{a}{x}\right)^3 = \frac{a}{x} \cdot \frac{x}{y} \cdot \frac{y}{2a} = \frac{1}{2}$$

Tilbage står, at  $\left(\frac{a}{x}\right)^3 = \frac{a^3}{x^3} = \frac{1}{2}$ . Hvis vi ganger med 2, og derefter med  $x^3$ , på begge sider, kan udtrykket omformes til  $2a^3 = x^3$ . Resterende er kun at bestemme  $x$ : Det kan fx findes som skæringspunkt mellem parablen  $a \cdot y = x^2$  og hyperblen  $y = \frac{2a^2}{x}$ .

såkaldte klassiske problemer ikke kunne løses med passer og lineal.

I det antikke Grækenland formulerede man de såkaldte Klassiske problemer. Et af disse kaldes "Terningens fordobling". Hvis der er givet en terning med et bestemt rumfang, så skal man konstruere siden i en terning med det dobbelte rumfang. For alle problemer gælder, at løsningerne skal kunne findes udelukkende ved at gøre brug af passer og lineal (uden måleegen-skaber). På trods af mange geniale løsninger, hvor man brugte andre værktøjer, kunne problemet ikke løses med de givne forudsætninger.

I 1637 præsenterede Descartes i sin bog "La Geometrie", *Geometrien*, en forklaring på hvorfor. I denne formulerer Descartes grundstenen til den analytiske geometri og introducerer det, som bliver til det kartesiske koordinatsystem. I dette værk viser han, hvorledes geometriske konstruktionsproblemer kan oversættes til ligningssystemer og demonstrerer, hvordan de kan løses algebraisk. Derefter viser han, hvordan løsningerne til ligningerne kan konstrueres geometrisk.

Han viser, at problemer, som giver anledning til en andengrads-ligning, har en løsning, som kan konstrueres ved hjælp af passer og lineal. Omvendt kan problemer, der oversættes til en ligning hvis grad er tre, ikke nødvendigvis løses med disse redskaber. Specielt kan løsningen af problemer, som giver anledning til en tredjegrads-ligning, som ikke har rationale rødder, ikke konstrueres. Hvis man oversætter fordoblingen af terningen til en ligning, bliver det netop til en sådan tredjegrads-ligning, og løsningen kan derfor ikke konstrueres med disse værktøjer.

Men for at alt dette kan indses, er man nødt til have noget notation, som tillader, at man kan tale om anden, tredje, eller generelt  $n$ 'te gradsligninger. En forudsætning for Descartes' indsigt var, at han blandt andet indførte konven-



Portræt af den franske filosof og matematiker René Descartes (1596-1650), malet af Frans Hals. Blandt Descartes bidrag til matematikken var en forklaring på, hvorfor de såkaldte klassiske problemer ikke kunne løses med passer og lineal.

tionen, at et tal ganget med sig selv et antal gange skal skrives ved hjælp af en potens, for eksempel at  $a^3 = a \cdot a \cdot a$ . En anden konvention var, at linjestykker betegnes ved et

enkelt bogstav (for eksempel "a") i stedet for ved deres endepunkter, som blev benyttet i den tidligere græske matematik, fx hos Euklid. Konstruktionen af et kvadrat eller en terning på et linjestykke kan således udtrykkes algebraisk som  $a^2$  eller  $a^3$ . Ved oversættelse af de geometriske problemer opnår man så ligninger i *forskellig grad* – udtrykt ved tallet i potens. Denne information kan ikke observeres i den geometriske kontekst, der består af geometriske figurer og simple kurver samt konstruktioner af disse.

Til sidst skal det lige nævnes, at Descartes ikke var i stand til at formulere et stringent bevis for sin påstand. Beviset kræver begreber fra den abstrakte algebra, som først blev introduceret i løbet af det 19. århundrede.

### Forskellig notation giver forskellige fordele

Ovenstående illustrerer, hvordan indførelse af notation og en velegnet repræsentation gør det muligt

at opnå nye indsigter i matematikken. Endvidere så vi i starten af artiklen, hvordan notation benyttes i beregninger og kan udnyttes i matematisk bevisførelse. I eksemplet med de Klassiske problemer, fordoblingen af terningen, så vi, at der er to måder at repræsentere og håndtere problemerne – både geometrisk og algebraisk. Tilsvarende findes eksempler på, at der er forskellige systemer af notation for det samme matematiske område. For eksempel har man igennem historien benyttet et utal af symbolsystemer for tallene. De fleste har, udover vores arabiske titalssystem, også stødt på det romerske additive talsystem. Hvert af disse systemer har forskellige fordele. I det tilhørende materiale i online-versionen af denne artikel illustreres denne pointe – at der kan være forskellige systemer af notation for det samme matematiske område, og at disse systemer har forskellige styrker, afhængig af hvad de bruges til. Det konkrete område, der tages udgangspunkt i, er udsagnslogik. ■

**Yderligere læsning**  
På Aktuel Naturvidenskabshjemmeside finder du supplerende materiale til denne artikel i form af artiklen: *Udsagnslogik - styrker og svagheder ved forskellige systemer af notation.*

Florian Cajori 2011: *A history of mathematical notations.* Dover Publications.

Victor J. Katz 2009: *A History of Mathematics. An Introduction.* 3rd Edition. Pearson Education, Inc.

Jesper Lützen 1993: *Cirkelns kvadratur, vinkelens tredeling og terningens fordobling.* 2. oplag. Systime.

Få pladser grundet COVID-19 restriktioner

sdu.dk/ing #sduing

## Faldskærm i fart på Alsion

Vi inviterer alle fysikhold i det almene gymnasium og htx til Faldskærm i fart-konkurrencen på Alsion i Sønderborg torsdag den 3. december 2020.

Faldskærm i fart på SDU Sønderborg er en konkurrence for gymnasier, hvor fysikklasser på alle niveauer er inviteret til at dyste med deres egne selvbyggede faldskærme i de to konkurrencediscipliner Premium Class Award og Innovation Award.

Tilmeldte klasser får tilsendt et Faldskærm i fart-kit med undervisningsmateriale, der kan anvendes i forberedelsen til konkurrencen, samt materialer og udstyr, der egner sig til at konstruere små faldskærme af.

På konkurrencedagen sendes faldskærmene ud i frit fald på 12,5 meter inde i universitetsbygningen Alsion. Tilmeldte klasser kommer enkeltvis til faldskærmskast. Program følger efter tilmelding.

Der er flotte præmier til vinderne af de to konkurrencediscipliner.

**Tilmeldingsfrist er fredag den 30. oktober.**

Mere information og tilmelding finder du her:

**[www.sdu.dk/faldskaermskonkurrence](http://www.sdu.dk/faldskaermskonkurrence)**

Videnskabelig logik kan ifølge forfatteren karakteriseres ved, at den logiske sammenhæng mellem to fænomener beskrives ved en sandsynlighed. For eksempel sandsynligheden for, at det begynder at regne givet, at der er skyer.  
Foto: Colourbox

# VIDENSKABELIG LOGIK

Den i Danmark relativt ukendte amerikanske fysiker Edwin Thompson Jaynes har givet et interessant forslag til, hvordan man generelt kan forstå videnskabelig logik ved hjælp af sandsynlighedsregning.

**D**e fleste vil nok være enige i at en vis form for logisk tænkning er en forudsætning for videnskabelig aktivitet. Men hvad er det for en logisk tænkning, man anvender i videnskab, og hvordan adskiller moderne kvantitativ, logisk tænkning sig fra den kvalitative logik, som først blev formuleret af Aristoteles i det antikke Grækenland?

Et eksempel på Aristotelisk logik er den logiske syllogisme, som består af to præmisser og en konklusion: For eksempel a) hvis det regner, så er der skyer og b) det regner; heraf kan vi slutte, at der må være skyer. Denne form for logik leder dog sjældent til noget særlig interessant – i det konkrete tilfælde er udsagnet om, at der er skyer, hvis det regner, trivielt og ikke til meget nytte. I stedet vil det være mere interessant at kende sandsynligheden for, at det begynder at regne, hvis der er skyer, men her kan de kategoriske sætninger i den Aristoteliske logik ikke hjælpe os.

De fleste interessante naturvidenskabelige og samfundsfaglige udsagn involverer en vis grad af usikkerhed, og til at kvantificere og

beskrive denne usikkerhed anvender vi begrebet sandsynlighed. Den amerikanske fysiker Edwin Thompson Jaynes (1922 – 1998) har vist, hvordan man kan generalisere den Aristoteliske logik til et kvantitativt logisk system ved hjælp af sandsynlighedsregning. Først viser Jaynes, hvordan man kan udlede sandsynlighedsregning ud fra simple verbale udsagn om, hvad man bør kræve af et system, som kan regne med usikkerheder. Hvis man kræver, at systemet skal være konsistent og være i kvalita-

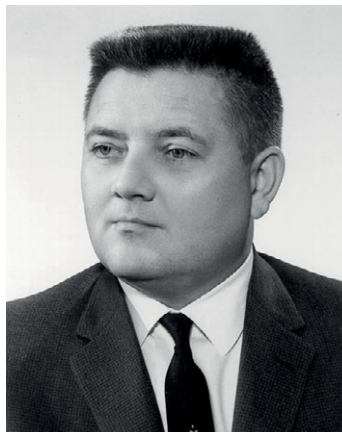
tiv overensstemmelse med almindelig sund fornuft, samt at graden af sandsynlighed skal udtrykkes med et reelt tal, så vil man deraf kunne udlede produktreglen  $P(AB|C) = P(A|BC)P(B|C)$ , hvilket igen er tilstrækkeligt til at udlede de matematiske sætninger i sandsynlighedsregning. Jaynes viser endvidere, at såkaldt Bayesiansk statistik er et matematisk konsistent værktøj til at kvantificere og kommunikere videnskabelige usikkerheder.

## Videnskabelig logik

Bayesiansk statistik afviger fra den mest anvendte form for statistik (frekventistisk statistik), blandt andet ved at man specificerer sin usikkerhed om modeller og parametre, før man har indsamlet data, ved det man kalder en prior sandsynlighedsfordeling. For eksempel kender vi på forhånd nogenlunde fordelingen af hyppigheden af regnvejr i Danmark, uafhængig af om der er skyer eller ej. Denne specificering af ens forhåndsviden (prior viden) har den matematiske konsekvens, at alle resultater og test af hypoteser kan beskrives ved sandsynligheder eller sandsynlighedsfordelinger.



**Forfatteren**  
Christian F. Damgaard er professor dr. Scient ved Institut for Bioscience, Aarhus Universitet. Han arbejder med plantepopulationsbiologi og matematisk og statistisk modellering af planteøkologiske processer.  
cfd@bios.au.dk



Edwin Thompson Jaynes (1922 – 1998) var en amerikansk fysiker, som arbejdede med statistisk mekanik, entropi, Bayesiansk statistik og videnskabelig logik.

Ved hjælp af Bayesiansk statistik er det således muligt at beregne sandsynligheden for, at en hypotese er sand. Anvendelsen af Bayesiansk statistik i analysen af videnskabelige spørgsmål kan vi derfor kalde *videnskabelig logik*, forstået på den måde, at den logiske sammenhæng mellem to fænomener beskrives ved en sandsynlighed. For eksempel beskriver udtrykket  $P(\text{regn}|\text{skyer})$  sandsynligheden for, at det begynder at regne givet, at der er skyer, og den sandsynlighed kan beregnes ud fra modeller og data om sammenhængen mellem skyer og regn. Den Aristoteliske logik er et specialtilfælde af den videnskabelige logik, som gælder i de tilfælde, hvor denne sandsynlighed enten er 1 (sand) eller 0 (falsk).

To ting er vigtige at fremhæve: En sandsynlighed er ikke noget, som findes i naturen, for eksempel indeholdt i en terning, men derimod kun noget som findes i vores bevidsthed til at beskrive vores usikkerhed om et givet fænomen, for eksempel om vi slår en sekser ved næste terningkast. Dernæst, at en logisk sammenhæng ikke betyder, at der nødvendigvis er en kausal sammenhæng (dette gælder også for de tilfælde, hvor vi kan anvende den Aristoteliske logik). Fænomener kan godt være korrelerede, uden at dette betyder, at de afhænger direkte af hinanden (eksempelvis antallet af solgte is og drukneulykker) eller at vi ved, hvilke af de logisk forbundne fænomener, som påvirker de andre. Derfor er den videnskabelige undersøgelse ikke tilendebragt ved en tilfredsstillende statistisk analyse af de logiske sammenhænge af et konkret problem. Formålet med en videnskabelig undersøgelse vil ofte være at forstå de relevante kausale sammenhænge, så man kan opnå en egentlig forståelse af fænomenet.

Allerede i 1300-tallet foreslog Nicolas fra Autrecourt, at man burde vælge den mest sandsynlige hypotese, hvis der var flere mulige hypoteser at vælge imellem. Men han var nødt til at afsværges sig sådanne ideer efter pres fra paven.



Foto: Colourbox

## Laplace's løsning

Hvis man har set 1000 forskellige (uafhængige) hvide svaner, hvad er så sandsynligheden for, at den næste svane, man ser, er hvid? Dette problem blev undersøgt af Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827), som var en af pionererne i udviklingen af Bayesiansk statistik (som med bedre ret burde kaldes Laplace statistik). Han fandt ved brug af en uniform prior sandsynlighedsfordeling, at  $p = (k + 1) / (k + 2)$ , hvor  $k$  er antallet af observerede hvide svaner, hvilket giver  $p = 1001/1002 = 0,999$ .

## Derfor virker den induktive metode

Ved at forstå videnskabelig logik som kvantificering af vores usikkerheder bliver det også muligt at forstå, hvordan forskning foregår i praksis. Man støder tit på det udsagn, at det ikke er tilladt at generalisere ud fra observationer (induktion) – selv om man har set et utal af hvide svaner, kan man ikke konkludere, at alle svaner er hvide. Filosofen Karl Popper advokerede i forlængelse heraf for, at det videnskabelige arbejde burde ses som en kontinuerlig afprøvnings og eventuel falsifikation af de for nuværende gældende hypoteser. En sådan stadig afprøvnings af den videnskabelige konsensus er selvfølgelig vigtig, men det er misvisende at opfatte videnskabeligt arbejde primært som en stadig stræben efter at falsificere hypoteser. Hovedparten af praktisk

videnskabeligt arbejde består faktisk i at prøve at generalisere viden ud fra observationer eller eksperimenter ved hjælp af den induktive metode, for eksempel ved at fitte den bedste rette linje gennem nogle observationer. Grunden til, at denne induktive metode rent faktisk virker, er, fordi vi ved, at vores postulerede generelle viden er forbundet med en vis usikkerhed; det er måske ikke alle svaner, som er hvide, men det er overvejende sandsynligt, at den næste svane, vi møder, er hvid (se boks). Ved at anvende videnskabelig logik kan vi således give den nyttige induktive videnskabelige metode et fast og kvantitativt fundament.

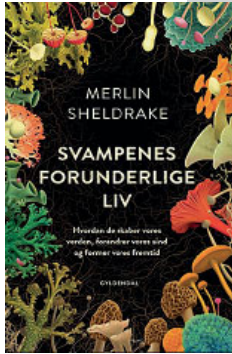
En bedre forståelse af Bayesiansk statistik og videnskabelig logik vil betyde, at vi får en bedre teoretisk forståelse for, hvorfor den induktive videnskabelige metode virker i praksis, og gøre os bedre til at beregne og kommunikere usikkerhederne af vores videnskabelige resultater. ■

**Litteratur**  
Jaynes, E.T., 2003. Probability theory: the logic and science. Cambridge University Press, Cambridge.

# BØGER

## FAKTA

Merlin Sheldrake: *Svampenes forunderlige liv*. Gyldendal 2020. 411 sider, 299,95 kr.



### Svampenes forunderlige liv

Som dyr og planter tilhører svampe et rige for sig selv – de findes overalt, i jorden, i luften og vores kroppe. De omfatter både mikroskopiske sporer og nogle af de største og mest vidtstrakte organismer på vores klode, som skjult strækker sig under jordens overflade.

Den britiske biolog Merlin Sheldrake har skrevet denne bog om svampenes store univers og deres sofistikerede eksistensform. Nyere forskning tyder for eksempel på, at svampe kan bruges til behandling af psykiske sygdomme som angst og depression, og der bliver arbejdet på at udvikle teknologi til at få svampe til at spise plastik, sprængstoffer og pesticider.

Svampenes forunderlige liv henvender sig til et bredt publikum, og den blander naturfortælling, videnskabsformidling, kulturhistorie og personlig beretning.

## FAKTA

Mere om udstillingen:  
[www.wpy.dk](http://www.wpy.dk)



Foto: Mogens Trolle

### Verdensberømt fotoudstilling til Danmark

Den internationale fotokonkurrence *Wildlife Photographer of the Year* er verdens største af sin slags. Nu kommer udstillingen med de 99 bedste billeder af natur og dyreliv til Danmark, hvor den kan opleves på Statens Naturhistoriske Museum i København i perioden 4. december 2020 til 9. maj 2021.

## FAKTA

Laura Smidt Hansen, Peder Kjær Gasbjerg, Lærke Smidt Gasbjerg – illustreret af Brian Dall Schyth: *Naturvidenskabelig førstehjælp*. FADL's forlag 2020. 264 sider, 249,95 kr.



### Naturvidenskabelig førstehjælp

Bogen *Naturvidenskabelig førstehjælp* gennemgår i 28 kapitler alt fra videnskabsteori, cellulær transport og buffersystemer til logaritmer, genetik, iontransport og billeddiagnostik. Hele vejen igennem understøttes hvert kapitel af en tegneserie, hvor læseren kan følge Caroline, der starter i den kliniske basisuddannelse (KBU) og undervejs får mange faglige og personlige udfordringer. Ideen med bogen er på den måde, at den kan bygge bro mellem det gymnasiale niveau og begyndelsen af lægevidenskabelige uddannelser på universitetet. Hvert kapitel af tegneserien er efterfulgt af et naturvidenskabeligt emne, som kort og præcist genopfrisker og perspektiverer emnet for den kommende/nuværende/tidligere medicinstuderende eller anden naturvidenskabeligt interesserede læser. Bogen kan bruges som opslagsværk for at genopfriske store dele af lægevidenskabens naturvidenskabelige grundlag.

Wildlife Photographer of the Year er produceret af Natural History Museum i London, og den årligt tilbagevendende konkurrence er naturfotografernes svar på Oscar-uddelingen, som samler de dygtigste amatører og professionelle fra hele verden. Udstillingen består af 99 billeder, som en international jury har udvalgt mellem næsten 50.000 indsendte fotos. Blandt dem skal vinderne af konkurrencens forskellige kategorier findes, og den bedste fotograf løber af med den prestigefyldte titel som Wildlife Photographer of the Year.

På udstillingen kan blandt opleves det viste portræt af en næseabe, som dyrefotograf og zoolog Mogens Trolle, ansat ved Statens Naturhistoriske Museum har taget. Billedet vandt kategorien "Dyreportrætter".





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)

# LIVESTREAMING TIL GYMNASIEKLASSER

FORELÆSNINGER DIREKTE I UNDERVISNINGEN

Giv eleverne direkte adgang til forskerne på Aarhus Universitet og deres viden gennem forelæsninger inden for flere fagområder, bl.a.:

- Hvorfor har vi ikke kureret kræft? Matematiske modeller og kræftmutationer.  
*Torsdag d. 26. november kl. 10-11.*
- Fremtidens grønne energiforsyning - vedvarende energis rolle i klimakampen.  
*Tirsdag d. 15. december kl. 10-11.*

Læs mere på  
[AU.DK/GYM](http://AU.DK/GYM)



AARHUS  
UNIVERSITET

## OPLEV UNIVERSITETET INDEFRA BLIV STUDERENDE FOR EN DAG

Besøg Aarhus Universitet og oplev hverdagen som studerende på de **naturvidenskabelige uddannelser og ingeniøruddannelserne**.

**Oplev studielivet, kom med til undervisning og stil spørgsmål** til den studerende, som du følger, mens du er 'studerende for en dag'.

Læs mere på

[NAT.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG](http://NAT.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG)

[TECH.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG](http://TECH.AU.DK/STUDERENDEFORENDAG)



## Undervisningsmaterialer

I et nyt projekt vil Aktuel Naturvidenskab samarbejde Viborg Gymnasium og Viborg Katedralskole om at lave artikler og undervisningsmateriale, der knytter an til foredragsrækken Offentlige foredrag i Naturvidenskab. Disse foredrag kan opleves som livestream på en lang række lokationer over hele landet (se ofn.au.dk). Projektet er finansieret af Novo Nordisk Fonden.

### Rejsen ud i rummet

Den første artikel samt undervisningsmaterialer kan du nu finde på Aktuel Naturvidenskabs hjemmeside, og det knytter sig til foredraget *Rejsen ud i rummet* med professor i astrofysik Hans Kjeldsen, der blev afholdt den 6. oktober. Undervisningsmaterialet består af i alt fire arbejdsark:

**Undvigelses-hastighed:** Niveau: Fysik C/B-niveau (men kan med lidt justeringer tilpasses A-niveau). Arbejdsarket kan bruges i forbindelse med et forløb omkring bevægelse eller astronomi.

**Forudsætninger:** Kendskab til kinetisk og potentiel energi nær Jorden.

**Hohmann-baner:** Niveau: Astronomi C, Fysik A, Fysik B og Fysik C. Arbejdsarket kan bruges i forbindelse med et forløb, der bygger på emnet artiklen *Rejsen ud i rummet*. Det kan også bruges i et forløb om "Den nære astronomi", for eksempel i forbindelse med Keplers love.

**Solen:** Arbejdsark beregnet på at give eleverne kan få en generel viden om Solen. Målgruppe: Astronomi C, Fysik C i et tema om rumfart eller astronomi.

**Solar Orbiter missionen:** I dette arbejdsark skal eleverne arbejde med Solar Orbiter Missionen og dens bane. Målgruppe: Astronomi C, Fysik C i et tema om rumfart eller astronomi.

### Quiz

Quizzen *Rejsen ud i rummet* består af 6 spørgsmål, der kan teste, om man har forstået de vigtigste budskaber i artiklen af samme navn.

## 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
- **Mette Christina Møller Andersen**, specialkonsulent, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Niels Kring**, chefkonsulent, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Sanne Holm Nielsen**, kommunikationsmedarbejder, Aalborg Universitet
- **Søren Rud Keiding**, direktør for AIAS (Aarhus Institute of Advanced Studies), 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: 5.400



### Redaktionsgruppe

- **Birgitte Dalgaard**, Det Tekniske Fakultet, Syddansk Universitet
- **Birgitte Svennevig**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Carsten Rabæk Kjær**, 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)

Facebook.com/aktuelnaturvidenskab

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

Omslagsfoto:

Vindmøller og højspændingsnet er vigtige dele af den grønne omstilling. Foto: Colourbox.

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

# Varm tid med kolde krystaller

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

**H**avtemperaturer på 33 grader i gennemsnit lyder ikke just som danske forhold. Men langt tilbage i tiden – nærmere betegnet til den tidligste del af Eocæn-tiden for mellem 56 og 54 millioner år siden – var sådanne temperaturer dagens orden.

Men hvorfor kan man så i Danmark finde store krystaller fra den tid, der normalt kun dannes i havet ved temperaturer under 4 grader? Det har længe været lidt af en gåde, men nu er forskerne Nicolas Thibault, Madeleine Vickers, Christian Bjerrum og Christoph Korte fra Institut for Geoviden­skab og Naturforvaltning ved Københavns Universitet sammen med kolleger fra Fossil og Moler­museet, Fur Museum og internationale kolleger kommet med en god forklaring.

Før vi kommer til den forklaring, skal vi lige præ­sentere for historiens hovedperson: De krystaller, vi taler om, kaldes glendonitter, og dem kan man være heldig at finde i moleret på Fur og Mors i Nordjylland. De danske glendonitter er de største, man har fundet i verden – op til 80 cm på længste led. De består af mineralet calcit ( $\text{CaCO}_3$ ), men krystalstrukturen afslører, at krystallen oprindel­ig har bestået af et andet mineral, der siden er blevet erstattet af calcit. Så i virkeligheden er en glendonit en afstøbning af et mineral. Glendonitter har man kendt til siden 1820'erne, men det var først i 1980'erne, at man fandt ud af, hvad det oprindelige mineral var – nemlig Ikait, som er i familie med calcit, men har indbygget vand i sin krystalstruktur ( $\text{CaCO}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ).

## Isotoper afslører temperaturen

At det netop er Ikait, der har givet ophav til de flotte glendonit-krystaller, er samtidig det, der giver ophav til mysteriet: Dannelsen af stabile krystaller af Ikait kræver havtemperaturer under 4 grader, og derfor tolkes fund af glendonitter i fortidige aflej­ringer som indikatorer på koldt vand. Men hvorfor optræder de



Madeline Vickers, førsteforfatter på det nye studium, ved en samling af Fur-glendonitter på Fossil- og Moler­museet.

Foto: Nicolas Thibault.

så i moleret, når de mange dyre- og plan­tefossiler, man også finder her, fortæller om et tropisk eller subtropisk miljø?

En mulighed er, at dannelsen af Ikait alligevel ikke kræver så lave temperaturer – og den ide har fået næring af, at det er lykkedes andre forskere at gro og stabilisere syntetiske ikaitkrystaller i laboratoriet ved 35 °C. Men det er ikke forklaringen på de danske glendonitter, viser det nye studie af KU-forskere og deres kolleger. Ved at analysere gensidigt bundne isotoper af kulstof og oxygen i glendonitter har forskerne kunnet rekonstruere temperatu­ren på de havdybder (<300 meter), hvor de oprindelige ikait-krystaller blev dannet. Og det viser sig, at temperaturen faktisk har været frysene lav, dvs. under 4 °C.

Det er første gang, at forskere har kunnet påvise så lave temperaturer i den tidlige

Eocæn-tid noget sted på jorden. Denne tid var ellers den varmeste periode de se­neste 66 millioner år af Jordens historie.

## Vulkaner kan give kulde

Forklaringen på mysteriet er altså, at godt nok har der generelt været meget varmt i den tidligere Eocæntid, men varmen har været afbrudt af markante kuldeperioder. Og det mener forskerne hænger sammen med den voldsomme vulkanisme i Nordat­lanten, som prægede perioden (der også har sat sit aftryk på moleret, som indehol­der mange mørke lag af vulkansk aske).

Talrige og voldsomme vulkaneksplosioner i perioden kan have sendt store mængder svovlsyre­dråber op i stratosfæren, hvor de har ligget i årevis og skygget for solen og reflekteret sollyset væk. På den måde kunne man få regionale områder med koldt klima i en ellers brandvarm verden. ■