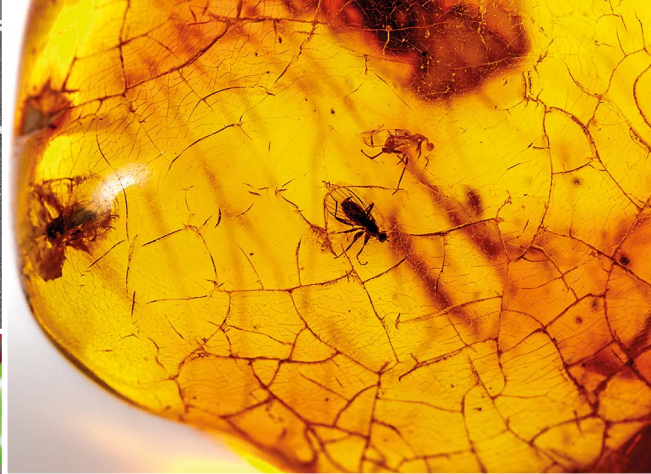


Mange af de materialer, vi støder på i hverdagen, optræder i virkeligheden i en glastilstand. Det gælder for eksempel asfalt, rav, bolsjer og mange plastikprodukter. Der findes også såkaldt metalglas – altså metaller, der er på glasform – og det er i dag et stort forskningsområde. For nogle år siden forsøgte firmaet RS Alloys sig med at lave golfkøller af metallisk glas.

Fotos: Colourbox



## Forskere undrer sig: **VI FORSTÅR IKKE TERMODYNAMIKKEN AF BOLSJER**

På trods af årtiers forskning har forskere stadig meget svært ved at forstå materialer, der optræder i den såkaldte glasfase. Den slags materialer er der mange af, for eksempel bolsjer, vinduesglas og mange typer plastik.

**I**enhver fysikbog i danske folkeskoler og gymnasier bliver eleverne præsenteret for det faktum, at stoffer kan eksistere i tre former; fast, flydende og som gas. Så er der et billede af et isbjerg, et glas med vand og en sky.

Når et stof kan eksistere i de tre former, skyldes det, at atomer eller

molekyler arrangerer sig forskelligt i strukturer afhængigt af temperatur. Ved fast form sidder molekylerne i faste, krystallinske strukturer med veldefinerede afstande mellem sig, og de bevæger sig ikke. Når et fast stof bliver flydende, ligger molekylerne stadig tæt pakket, men den krystallinske struktur bliver ophævet, og molekylerne kan nu bevæge

sig ind og ud mellem hinanden. I gasfasen er alting i uorden, og der er langt mellem molekylerne.

Et andet kendetegn ved denne tredelte opdeling af de forskellige faser, som et stof kan være i, er, at temperatur og tryk bestemmer, hvornår de er i den ene eller anden fase. Varmere man en isterning op,

### Om forfatteren

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 lektor ved DTU, Kirstine Berg-Sørensen. Se mere på [www.dff.dk](http://www.dff.dk)

bliver den til vand ved over 0 grader og et tryk på 1 atmosfæres tryk, og ved 100 grader bliver vand til damp.

Alt det ovenstående er skolelærdom for de fleste, men herefter går tingene galt. Hvis man kigger sig omkring i verden, finder man hurtigt ud af, at faktisk kun ganske få ting opfører sig som vand og indtager tre så veldefinerede former. Er kød som eksempel et fast stof, eller er det en væske? Og hvad med en cellemembran?

»I naturen består materialer for det meste af mikroskopiske blandinger af faste stoffer, væsker og gas. Når vi tænker på vand som enten is, væske eller gas, er det under idealiserede ligevægtsbetingelser, og hvordan stoffer opfører sig i termodynamisk ligevægt. Men der findes også stoffer, der er langt uden for ligevægt, og dem har vi i dag meget svært ved at forstå,« forklarer Professor Kristine Niss fra Institut for Naturvidenskab og Miljø på Roskilde Universitet (RUC).

Kristine Niss bedriver grundvidenskabelig materialeforskning og forsøger blandt andet på at skabe en grundlæggende forståelse af det fysiske fænomen, der hedder glasovergangen. Det kommer vi tilbage til lige om lidt.

### Vinduer og bolsjer er hverken flydende eller faste

Når det kommer til de stoffer, der opfører sig anderledes, så gælder det som eksempel faste stoffer, der har den mikroskopiske struktur som en væske. Her er selve materialet fast som en sten, men når forskere nærstudere de mikroskopiske strukturer inde i materialet, mangler den krystalinske struktur. I stedet ligger molekylerne helt uordnet som i en væske.

»Hvis man bare kigger på strukturen, vil man sige, at det er en væske, selvom det faktisk er et fast materiale. I fysikken kalder vi dem for amorfe faste stoffer,« forklarer Kristine Niss.

Og nu er det så om at holde tungen lige i munden.

De amorfe faste stoffer kaldes også for glasser, men selvom det måske

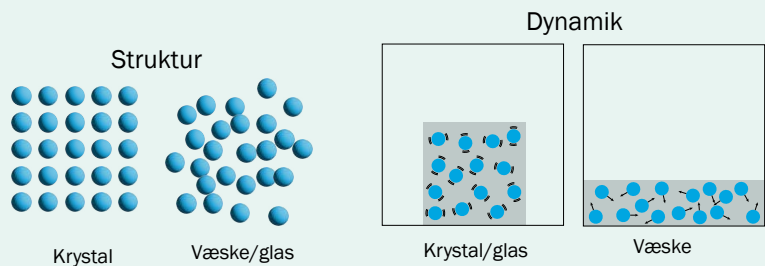
### Om Kristine Niss

Kristine Niss er professor i materialefysik ved Roskilde Universitet (RUC). Hun er uddannet fra RUC og skrev sin ph.d. inden for fysisk kemi ved Université Paris Sud. I 2007 blev hun ansat som adjunkt, og senere lektor og professor ved Institut for Natur og Miljø på RUC. Hendes primære forskningsinteresse er dynamik i væsker og glasser.



Foto: Jakob Klust

### Faser for stof



Fotos: Colourbox.

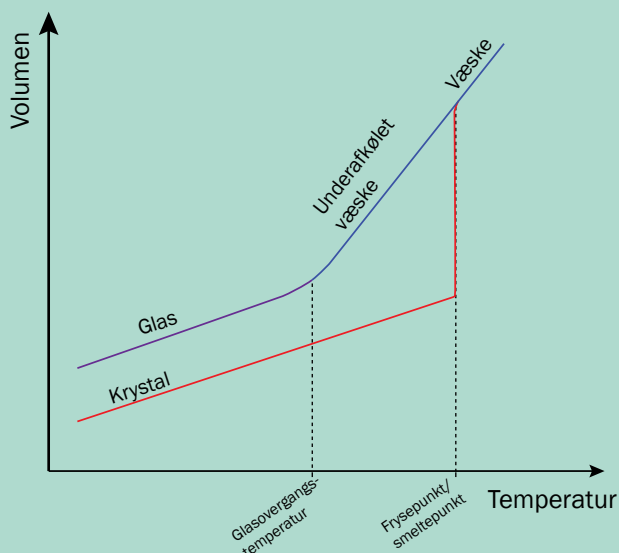
Vand er det velkendte eksempel på, hvordan stoffer kan optræde i en fast, krystallinsk fase og en flydende væskefase, og at de skifter mellem disse faser ved en veldefineret temperatur (fryse/smelte-punktet). Når stoffer danner en glasfase (for eksempel sukker), opfører det sig anderledes. For her kan materialet godt starte som et fast, krystallinsk stof, men når det smelter ved opvarmning, dannes en amorf glasfase, som bibeholdes, når materialet størkner igen ved afkøling. Nederst er det illustreret, hvordan man principielt skal forstå forskellen på strukturen og dynamikken af materialet i de forskellige faser. Mens en krystal er meget velordnet, er væske og glasfaser uordnede. Og mens molekylerne i en væskefase kan bevæge sig frit omkring, er de i krystal- og glasfaser fikseret i en bestemt position.





## Temperatur og glasovergangen

For langt de fleste væsker vil deres volumen blive mindre, når de afkøles, og når de krystalliserer, bliver volumen abrupt meget mindre. Hvis de i stedet bliver i væsketilstanden under frysepunktet, fortsætter væskens opførsel, indtil den når glasovergangen. Ved glasovergangen ses et knæk på linjen, fordi glas har mindre temperaturafhængig volumen end væske. Bemærk, at når det gælder materialer, der danner en krystallinsk struktur, skiller vand sig ud fra den generelle sammenhæng, der fremgår af figuren. Vand udvider sig nemlig, når det fryser, og det er der meget få andre stoffer, der gør.



leder tankerne hen på drikkeglas og karaffer, er glasser faktisk mange andre ting. Glasser er også nogle former for plastik, vinduer og sågar bolsjer og karamel. Fælles for vinduer og bolsjer er, at de begge stammer fra et fast materiale med en krystallinsk struktur, som er blevet varmet nok op, til at de krystallinske strukturer er blevet smeltet, og materialet er blevet til en væske. For glas gælder det, at det faste materiale er sand, der er blevet varmet op til flere tusinde grader for at lave glas, mens sukker er udgangspunktet for at lave bolsjer. I takt med at væsken af enten flydende sand eller sukker nedkøler igen, gendanner de ikke den krystallinske struktur mellem molekylerne, men i stedet bibeholdes den uordnede struktur fra væskefasen. Det gælder også, når selve materialet bliver hårdt igen.

»Men selvom det er glas og har mikroskopisk struktur som en væske, er det ikke en væske. Der er heller ikke en afgrænset overgang fra fast til flydende form eller omvendt. I stedet eksisterer der en glasovergang, hvor glasset, vinduet eller bolsjet bliver mere og mere fast, i takt med at det bliver kølet ned. De har struktur som noget flydende, men dynamik som noget fast,« fortæller Kristine Niss.

Glasovergangen er gradvis og undervejs, og der er et stadie, som er en mellemting mellem væske og den faste glas. Det samme gælder ikke for overgangen mellem is og vand. Her findes der ikke en mellemting.

Og her kommer problemet så:

»Mens vi har rigtig godt styr på faseovergangene mellem de forskellige faser i den ene type stoffer, har vi ingen god teori for, hvad der sker termodynamisk i glasovergangen, og det er det, som vi prøver at skabe på det grundvidenskabelige niveau i min forskningsgruppe,« siger Kristine Niss.

### Glasovergangen er afhængig af temperatur

I sin forskning forsøger Kristine Niss med sine kollegaer at blive klogere på, hvad der er bestemmende for forskelle i glasovergangen mellem forskellige stoffer. Betragter man et vindue, har det indre struktur som en væske, men det er bestemt ikke flydende ved stuetemperatur. Det er et bolsje heller ikke. Der er dog forskel på de to, og det vil man opdage, hvis man begynder at varme vinduer og bolsjer op. Hurtigt vil bolsjerne begynde at blive gradvist mere og mere flydende, men det vil først

ske ved meget højere temperaturer, når det gælder vinduesglas. Årsagen er, at vinduesglas ved stuetemperatur er meget langt fra deres termodynamiske ligevægt. Jo tættere temperaturen kommer på ligevægten, des mere flydende bliver vinduet. Bolsjer er ved stuetemperatur heller ikke tæt på sit termodynamiske ligevægtspunkt, men trods alt tættere på end vinduesglas. Derfor bliver bolsjer også flydende før vinduer. Karameller er ved stuetemperatur endnu tættere på deres termodynamiske ligevægtspunkt, og derfor kan en karamel også være hård som en sten, hvis man har haft den i tasken på en kold dag. Tager man en karamel i en varm hånd, bliver den helt blød.

Et andet eksempel på glasser, der opfører sig forskelligt ved forskellige temperaturer, er plastik. Plastik er i overvejende grad en kombination af krystaller og glas. Forholdet mellem de to former er afgørende for plastiks egenskaber, og hvor let det er at forme. For eksempel består en halvliter sodavandsflaske næsten udelukkende af plastik på glasform, og derfor kan man også smelte sodavandsflasker for at lave dem om til noget andet. Denne egenskab er meget vigtig indenfor den cirkulære økonomi. Det bety-

der også, at plastik også ændrer egenskaber over tid, fordi det ikke er i termodynamisk ligevægt.

»Det mystiske er, at vi endnu ikke ved, hvad der styrer, hvornår en væske bliver til glas. Vi ved, at det har noget med temperatur at gøre, for det kan vi måle. Vi ved, at vinduesglas smelter ved 1.000 grader, og at plastik smelter ved omkring 200 grader. Vi kan måle det, men vi kender ikke teorien bag. Omvendt har vi veletablerede teorier for overgangen fra væske til krystalform, men vi mangler den fysiske og kemiske forståelse for glasovergangen,« forklarer Kristine Niss.

Hun uddyber, at typisk bliver en væske til glas, når den bliver underafkølet. Man køler så at sige på en væske, indtil den bliver mere og mere sej gennem glasovergangen. På et tidspunkt er væsken så sej, at man ikke længere kan skelne den fra et fast stof, og så kalder man strukturen for glasstruktur.

»Det gør vi, når det ikke længere giver mening at kalde materialet for flydende, men der er ingen decideret overgang fra én fase til en anden, og det har vi ingen teoretisk forståelse af,« siger Kristine Niss.

### Forskningen er 30 år forsinket

I 1990'erne sagde den berømte fysiker Philip W. Anderson, at forskere indenfor 10 år ville have en færdig teori for glasovergangen, og at det ville komme til at have stor betydning for materialefysikken. Det er ved at være 30 år siden, og selvom forskere inden for feltet har håbet på, at gennembruddet snart ville være der, er de endnu ikke kommet frem til den hellige gral.

I Kristine Niss' forskningsarbejde måler hun på alle mulige væsker og glasser under forskellige betingelser, herunder varierende tryk, temperatur og elektrisk spænding, for at gøre sig selv og alle sine materiale-forsker-kolleger klogere. Formålet er at finde ud af, hvor generel en teori for glasovergan-

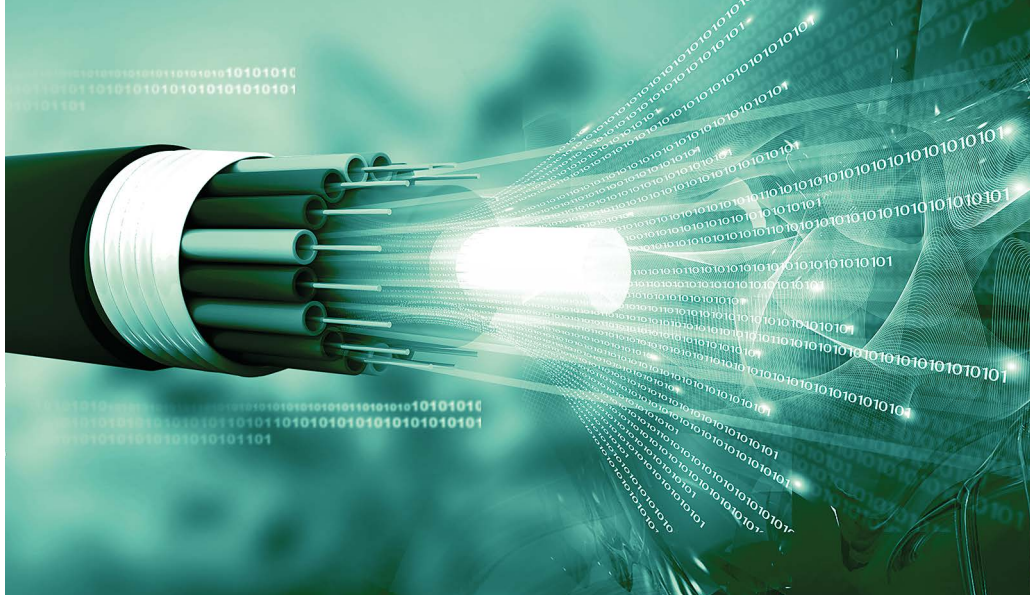


Illustration: Shutterstock

## 50 år med glasfasen og amorfe materialer

De seneste 50 års forskning i glasfasen har haft en betydelig indflydelse på en bred vifte af teknologiske og videnskabelige felter. I 1970'erne begyndte forskere at undersøge de grundlæggende egenskaber ved amorfe materialer, som mangler den regelmæssige atomare struktur, der kendetegner krystaller. Denne forskningsindsats førte til en dybere forståelse af glasovergangstemperaturen, en kritisk parameter, der definerer overgangen fra en fast, glasagtig tilstand til en mere flydende eller gummiagtig tilstand. Dette arbejde lagde grundlaget for mange af de senere anvendelser af glasfaser i teknologi og industri.

I 1980'erne og 1990'erne blev glasfaser en central del af udviklingen indenfor optisk kommunikation. Udviklingen af optiske fibre, der er lavet af højrenhedsglas, revolutionerede telekommunikationsindustrien ved at muliggøre hurtig og effektiv dataoverførsel over lange afstande. Glasfaser i optiske fibre giver lavt tab og høj båndbredde, hvilket gør dem ideelle til brug i globale kommunikationsnetværk. Denne teknologi blev hurtigt udbredt og er i dag en uundværlig del af internettets infrastruktur.

Samtidig begyndte forskningen at fokusere på glasfaser indenfor optoelektronik og fotonik. Forskere udforskede glasfasers evne til at interagere med lys, hvilket førte til udviklingen af en række optiske komponenter som lasere, sensorer og lysledere. Glasmaterialer som borosilikatglas og silica (siliciumdioxid) blev brugt i fremstillingen af disse komponenter, der er centrale i moderne medicinsk teknologi, herunder endoskoper og kirurgiske lasere.

I de senere årtier har bioaktive glasfaser også vundet plads indenfor medicinsk forskning. Disse materialer kan interagere med biologisk væv, fremme knoglevækst og bruges i implantater og regenerativ medicin. Bioaktive glas har vist sig særligt effektive i tandpleje, hvor de anvendes til at reparere og styrke knogle- og tandvæv.

Desuden har glasfaser fundet anvendelse indenfor områder som kemisk procesindustri, hvor deres modstandsdygtighed over for korrosion og høje temperaturer gør dem ideelle til brug i kemiske reaktorer og laboratoriestyr. I de seneste årtier har forskningen også udvidet sig til at omfatte glasfaser i avancerede arkitektoniske anvendelser, såsom smarte vinduer, der kan ændre deres lysgennemtrængelighed.

Samlet set har forskning i glasfasen over de seneste 50 år skabt fundamentet for mange teknologiske fremskridt og fortsætter med at spille en afgørende rolle i udviklingen af innovative løsninger indenfor både industrielle og medicinske felter.

*Til faktaboksen er der brugt andre kilder end Kristine Niss*



**DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND**  
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK



Kristine Niss i færd med at lave neutronsprengningseksperimenter ved forsøgsreaktoren ILL. Med neutroner kan man måle både dynamik og struktur af stoffer.  
Foto: Bo Jakobsen

gen det overhovedet er muligt at lave. Ligner de forskellige væsker og glasser hinanden så meget, at der kan laves én samlet teori, eller opfører de sig så forskelligt, at det slet ikke giver mening?

Forskerne undersøger også forskellige former for glasser, blandt andet metalglasser, plastikglasser og ioniske væsker. Så udsætter de materialerne for en given temperatur og trækker i dem for at se, hvordan temperaturændringen påvirker materialets egenskaber i glasovergangen. Så hæver eller sænker de temperaturen med et par grader og trækker i materialet igen. Alt sammen er for at forstå de mekaniske egenskaber for de forskellige materialer under glasovergangen.

Forskerne samarbejder også med teoretiske materialefysikere om

at efterprøve de nyeste teorier i laboratoriet og dataloger, der laver computersimuleringer af glasovergangen. De benytter også røntgen til at se, hvad der sker inde i materialerne under glasovergangen, og så undersøger de, hvordan forskellige faktorer påvirker, om et glas enten brækker eller bøjer, når man trækker og skubber til det.

Endelig undersøger forskerne, hvad der sker med stofferne, når de først er blevet til glas. Det betyder blandt andet, at forskerne laver fysiske målinger af glasser over meget lange tidsrum, målinger der tager helt op til et år. I den periode skal materialerne have været holdt under de samme temperatur- og trykforhold, hvilket blandt andet betyder, at der i Kristine Niss' laboratorium er en nødgenerator, som overtager temperaturstyringen i forsøgene i tilfælde af et strømafbud.

»Vi kan ikke have, at vi har haft et forsøg kørende i et halvt år, og vi så må kassere det hele, fordi strømmen ryger en aften. Det er et meget tålmodighedskrævende stykke forskningsarbejde,« siger Kristine Niss.

### Stor industriel interesse for glasfasen

Kristine Niss er dog ikke alene om at interessere sig for glasovergangen. Foruden lidt over 1.000 akademiske kollegaer verden over er glasovergangen også interessant for rigtig mange ingeniører, der arbejder indenfor forskellige industrier. Forståelsen af glasovergangen kan nemlig få betydning for helt ekstremt mange brancher. Det kan blandt andet dreje sig om udvikling af mobiltelefoner.

Skærmen på en mobiltelefon er lavet af glas, og forskellige egenskaber ved det glas bestemmer, om det går i stykker eller ej, når mobiltelefonen ryger på gulvet. Egenskaberne kan også gøre glasset på mobiltelefonen mere fleksibelt.

Et andet eksempel er indenfor plastikindustrien. Her har glasovergangen betydning for, om plastik kan genanvendes eller ej, og hvad det i det hele taget kan bruges til. Kristine Niss samarbejder selv med miljøbiologer om at forstå, hvad det har af betydning for dannelsen af mikroplastik, om plastik eksisterer som en glas eller i en krystalstruktur.

»Forståelse af glasovergangen kan få enormt stor betydning for alt indenfor materialefysikken. Hvis vi forstår, hvorfor forskellige materialer opfører sig, som de gør, og vi kan lave en teori for det, kan vi også bedre udvikle nye materialer med nye egenskaber. Disse materialer kan måske erstatte nogle af dem, som vi benytter i dag, men som vi gerne vil af med, for eksempel kompositmaterialer i vindmøller, der er umuligt at pille fra hinanden og genanvende,« siger Kristine Niss. ■