

INTRO TIL UORGANISK MATERIALEKEMI

2015



AARHUS UNIVERSITET



Redaktør, forfatter: Jacob Becker

Redaktionsassistent, medforfatter: Troels Lindahl Christiansen

Grafisk design: Astrid Reitzel, AU Events og Kommunikationsstøtte

Omslag: H.V. Lukas

Fotos: Jesper Rais, Mads Ry Jørgensen, H.V. Lukas, Colourbox

På omslag: Kemistuderende Paulina Kuziora

Rådgivere: Jens W. Clausen, Peter Hald, Kirstine Junker Dalgaard

Korrektur:

Annette Nyvad, Kolding Gymnasium

Vibeke Axelsen, Egå Gymnasium

Karl-Peder Larsen, Aabenraa Statsskole

Iben Hansen-Bruhn, Aabenraa Statsskole

Mikael S. Alstrup, Aabenraa Statsskole

Rasmus M. K. Fink, Aabenraa Statsskole

Rasmus S. Christensen, Aabenraa Statsskole

Tak til:

Center for Materialekrystallografi (DNRF93)

Bo Brummerstedt Iversen, Jacob Overgaard, Torben René Jensen, Mogens

Christensen, Martin Bremholm, Jens-Erik Jørgensen

Aabenraa Statsskole

ISBN: 978-87-998013-0-5

INDHOLD

Indledning	5
Materialekemi	6
Struktur og egenskaber	8
Synteser af materialer.....	10
Krystallografi – hvad er strukturen?	14
Krystallografi i praksis.....	16
Enkrytaller og pulvere.....	20
Krystalsystemer	22
Fra struktur til egenskaber	26
Materialeforskning på Aarhus Universitet	32
Uddannelse.....	42
Bachelorprojekter	44
SRP-projekter	46
Erhvervsliv	48
Personer bag uddannelsen.....	50

■ **AI videnskab er blot raffinering af hverdagens tænkning.**

Albert Einstein

INDLEDNING

Begrebet "materialer" dækker over alle de faste stoffer, vi har omkring os i hverdagen. Mange af disse stoffer er syntetiske, og forskningsfeltet bag dem kaldes samlet for "materialekemi". Det spiller en uundværlig rolle for hele vores teknologi og millioner af de apparater og produkter, der direkte eller indirekte præger vores dagligdag.

Dette hæfte omhandler den *uorganiske* materialekemi. Betegnelsen stammer fra den historiske opdeling mellem "organisk" som værende kemi baseret på kulstof, og "uorganisk" som værende kemi baseret på alle andre grundstoffer i det periodiske system. Trods de gråzoner, der åbenlyst findes ind imellem, skitserer dette meget godt positionen af uorganiske materialer sat over for kulstofbaserede materialer såsom polymerer og plastikstoffer, og naturmaterialer såsom kulhydrater, fedt og proteiner.

De fleste fagudtryk er hæftet igennem sat i kursiv. Ordene er også samlet i en ordliste på sidste side, sammen med en række af de øvrige udtryk, som hæftet benytter. Idéen er, at du direkte kan bruge dem alle som søgeord i Google, hvis du gerne vil vide mere om nogle af de mere specifikke begreber, hæftet berører. Ordlisten rummer også de engelske oversættelser, da engelske søgeord nogle gange giver flere eller bedre "hits" end søgninger på dansk.

Til udvalgte emner er der desuden lavet "Tiny URL" links, der også findes samlet på sidste side. Nogle af dem henviser til dansk materiale, andre til engelsk.

Herunder er samlet fire lidt mere overordnede links til Aarhus Universitet, som måske kan blive nyttige for dig; muligvis nu, under din gymnasietid, muligvis senere, hvis du kommer frem til at kemi-uddannelsen godt kunne være noget for dig.

Her og nu er forhåbningen blot, at du finder hæftet her og al dets indhold sjovt, interessant og spændende – dels i sig selv, dels i forbindelse med de laboratorieøvelser, der også følger med.

Besøgsservice:

[W chem.au.dk/videnudveksling/besoegsservice](https://www.chem.au.dk/videnudveksling/besoegsservice)

SRP-projekt tilbud:

[W chem.au.dk/videnudveksling/studieretningsprojekter-srp](https://www.chem.au.dk/videnudveksling/studieretningsprojekter-srp)

Institut for kemi:

[W chem.au.dk](https://www.chem.au.dk)

Studieguide til kemi

[W bachelor.au.dk/kemi](https://www.bachelor.au.dk/kemi)

MATERIALEKEMI

Dette afsnit giver en introduktion til hvad "uorganisk materialekemi" er, og hvordan feltet placerer sig i forhold til anden materialekemi. Afsnittet giver også et første indblik i, hvilken rolle de uorganiske materialer spiller i vores hverdag.

Materialekemi er studiet af alle faste stoffer med anvendelige egenskaber. Nyttighed spiller altså en central rolle, også selv om meget materialekemi er grundforskning. På Institut for Kemi ved Aarhus Universitet fokuserer vi konkret på sammenhængen mellem materialers grundlæggende opbygning og deres nyttige egenskaber. Feltet "materialekemi" spænder imidlertid vidt og bredt, og har forgreninger ind i både fysisk kemi, organisk kemi og uorganisk kemi.

Organisk materialekemi omfatter f.eks. syntese af kulstofbaserede polymerer i alle former samt deres molekyllære opførsel (betragtet som fysiske legemer). Anvendelserne spænder fra plaststoffer til maling og al lignende overfladebehandling, limprodukter, syntetiske tekstiler og meget mere. I modsætning hertil beskæftiger den uorganiske materialekemi sig med stoffer, der overvejende indeholder alle andre grundstoffer end kulstof. Dette er selvfølgelig en tommelfingerregel, og der findes gråzoner ind imellem, men opdelingen er bestemt brugbar.

Alle metaller, legeringer, keramiske stoffer, forskellige former for glas, metal-organiske forbindelser, mineraler, halvledere og ionforbindelser tilhører den uorganiske materialekemi. Hvert eneste materiale har kolossal betydning for vores samfund og hverdag. Dette gælder lige fra materialer, vi normalt opfatter som "low-tech" – f.eks. cement, beton, glas og stål – til højteknologien i computerchips, katalysatorer, superledere, brændselsceller og termoelektriske generatorer.

Vi har mange af disse avancerede uorganiske materialer omkring os i dagligdagen, og endnu flere der påvirker vores hverdag indirekte. Et glimrende eksempel er magneter, som vi normalt kun kender fra køleskabslågen. De er imidlertid også hjertet i alt fra computerhårddiske og elmotorer til elektricitetsfremstillingen i kraftværker og vindturbiner. Håndmiksere, hårtørrere, power-tools, støvsugere, printere, køleskabe og elbiler

virker udelukkende i kraft af magneter – skjulte uorganiske materialer. De findes alle steder hvor elektrisk energi skal laves om til kinetisk energi eller omvendt.

Netop i elbiler finder man endnu et eksempel på avanceret materialekemi, nemlig indholdet i de genopladelige batterier, der leverer strømmen. Lithium-ion batterier har f.eks. revolutioneret vores hverdag med alt lige fra mobiltelefoner til bærbare computere, musikafspillere, tablets og meget mere.

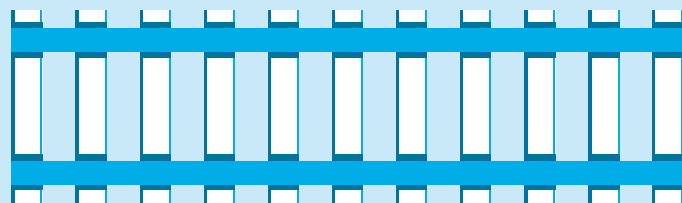
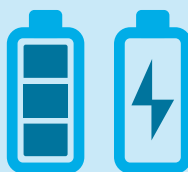
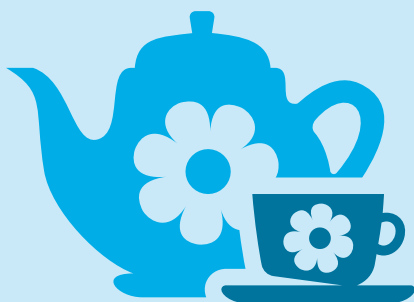
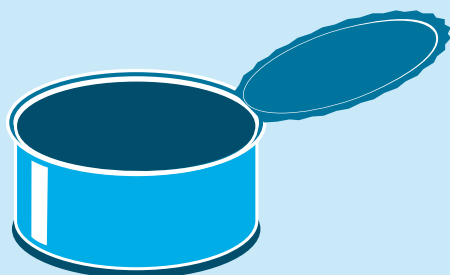
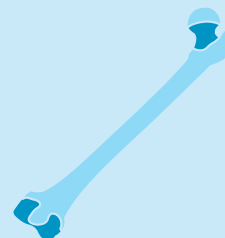
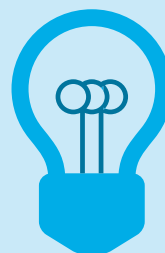
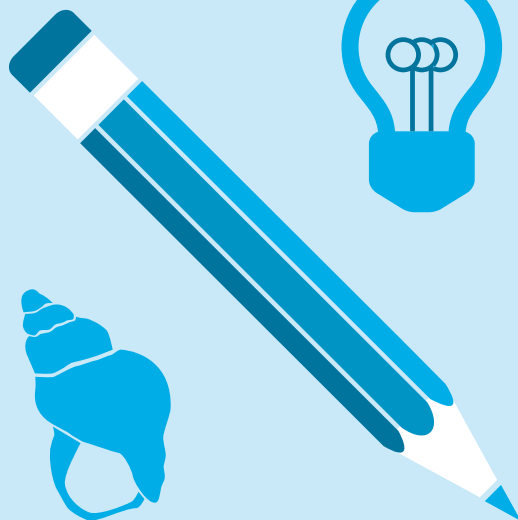
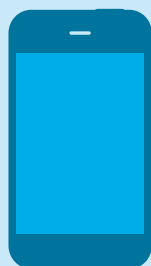
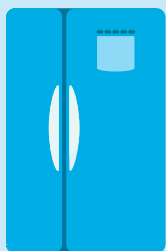
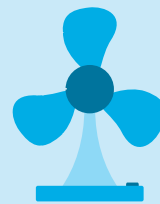
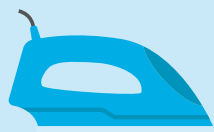
En del af disse anvendelser får om nogle år sandsynligvis assistance af brændselsceller, der er endnu et produkt af uorganisk materialekemi. Det findes enten i form af ionleder-membranen i hjertet af højtemperatur-brændselsceller, eller de katalytiske nanopartikler, der hjælper den kemiske reaktion på vej i lavtemperatur-celler.

Generelt er uorganiske materialer voldsomt udbredte i forbindelse med lagring og omdannelse af energi i vores samfund. I almindelige biler finder man muligvis om få år termoelektriske materialer, der direkte kan lave spildvarme om til strøm. Integreret i det varme udstødningsrør gør det en dynamo overflødig, og derfor bilernes benzinøkonomi bedre.

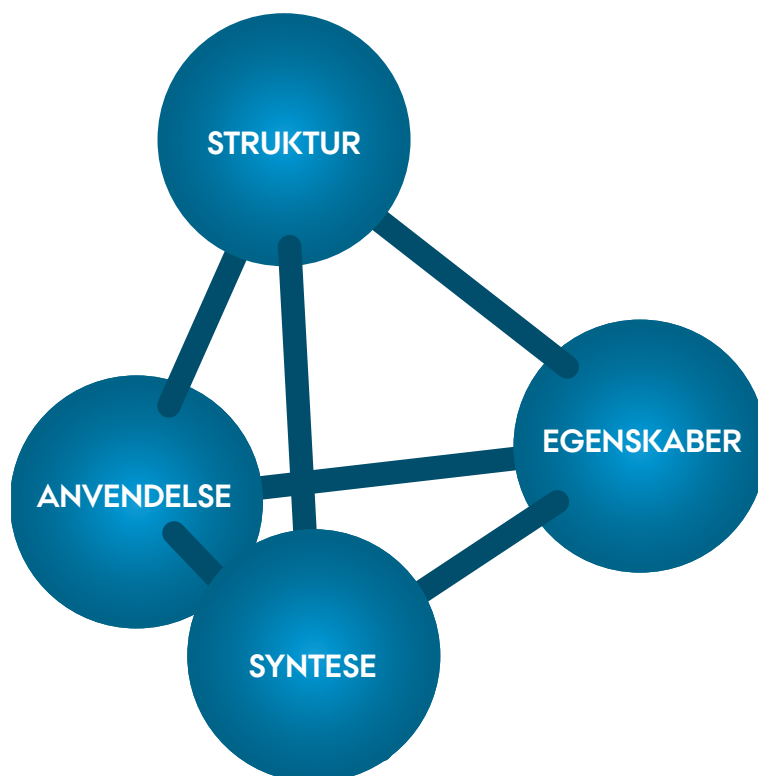
Solceller er endnu et forskningsfelt der domineres af den uorganiske materialekemi. Ved at gøre dem bedre, billigere og mere bæredygtige vil meget af menneskehedens elforbrug med tiden kunne komme direkte fra solen.

Eksemplerne fortsætter endeløst.

De fælles, underliggende spørgsmål, man kan stille, er hvordan materialekemikerne arbejder og bærer sig ad med at udvikle nye og forbedrede materialer.



Alle faste stoffer omkring os er i princippet "materialer". De kan være organiske, f.eks. plastikstoffer, processerede biologiske materialer (f.eks. træ) eller uorganiske, der bl.a. omfatter alle metaller, legeringer, mineraler, keramiske stoffer, halvledere (computerchips, LED-teknologi, etc.), glas-stoffer og et utal af andre materialer, der hører til i gråzonerne imellem kategorierne. Langt de fleste højteknologiske uorganiske materialer lægger vi nærmest aldrig mærke til i vores dagligdag.



STRUKTUR OG EGENSKABER

Her introduceres begrebet *struktur*: Materialers grundlæggende opbygning på atomart niveau. Derfra præsenteres materialekemiernes udfordring med at finde strukturens betydning for alt det, der gør materialerne anvendelige for os – deres *egenskaber*.

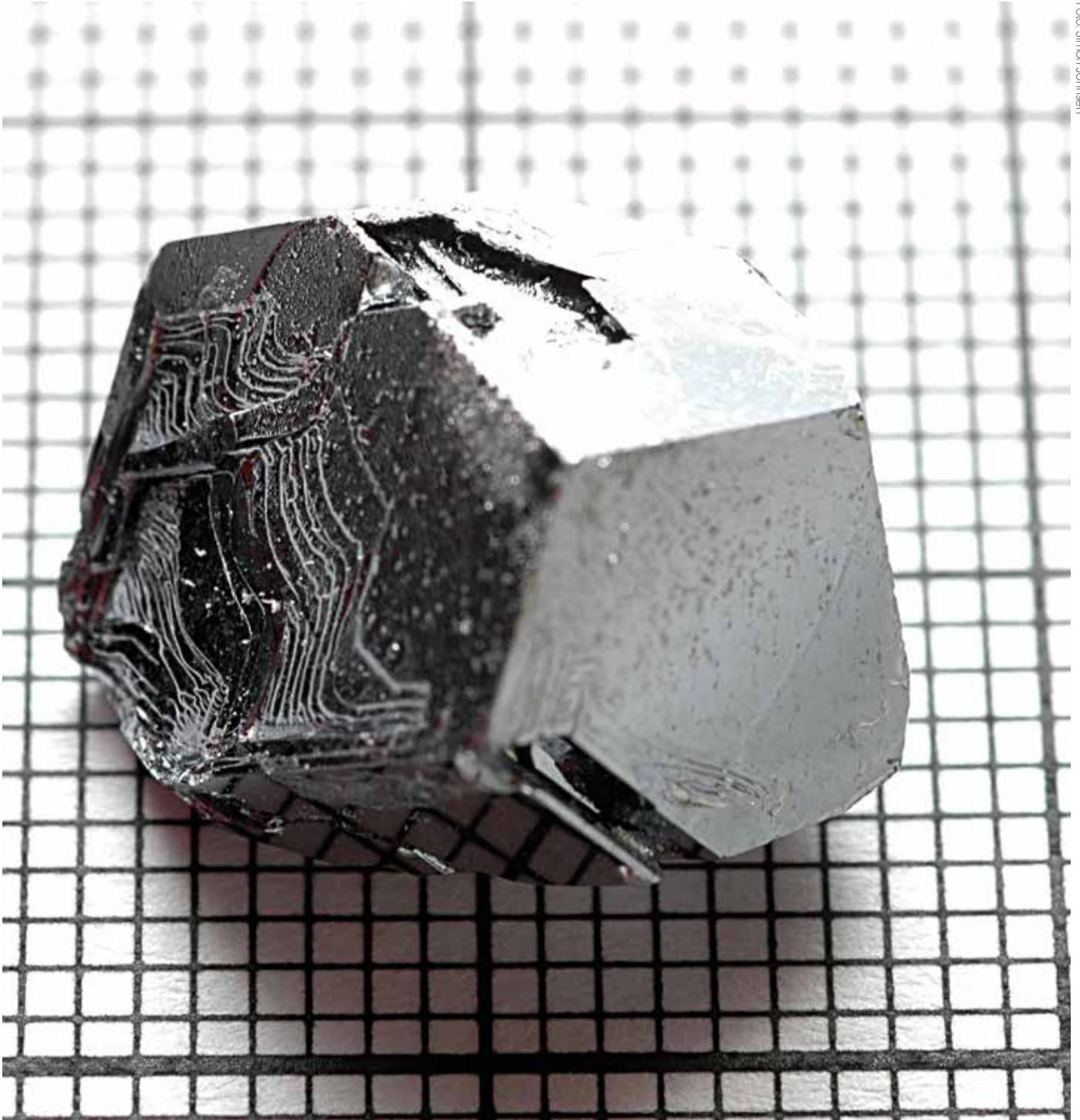
Det grundlæggende princip inden for al materialekemi er, at struktur og egenskaber hænger sammen. Med "struktur" mener man opbygningen af et materiale på det atomare plan, dvs. hvordan atomerne præcist er arrangeret i forhold til hinanden, og hvordan de kemiske bindinger imellem dem er indrettet. Det er de kemiske bindinger, der dikterer strukturen. Ud over dette omfatter begrebet "struktur" også mere overordnede forhold. Det kan være urenheder, partikelstørrelser og -faconer, lokale spændinger (f.eks. skabt af atomer, der er "for store" til den plads, de prøver at optage i strukturen), graden af orden eller uorden, osv. Den slags faktorer har alle stor effekt på materialers egenskaber.

Under "egenskaber" hører bl.a. alt det, der gør materialer værdifulde for vores samfund. Deres anvendelighed.

For at forstå egenskaberne til bunds, skal man forstå opbygningen på et meget grundlæggende plan. Det er den, der er roden til alt det, vi kan se, føle og opleve i alle faste stoffer vi har omkring os i vores hverdag. Tænk f.eks. på:

- Farver
- Lysbrydning
- Hårdhed
- Elasticitet
- Smeltning og fordampning
- Elektrisk ledningsevne, varmeledningsevne
- Varmekapacitet
- Halvleder-egenskaber (computerchips, LED-teknologi, m.m.)
- Magnetisme
- Katalytisk aktivitet – og al kemisk reaktivitet i øvrigt

Når du skal udforske nye og forbedrede materialer, er første skridt derfor at forstå strukturen og dens kobling til materialets egenskaber. Med denne viden kan du forsøge (med kemiske metoder) at ændre strukturen, så egenskaberne følger med – forhåbentlig i retning af det ønskede. Begge dele kræver specielle værktøjer, først til syntese, derefter til analyse og så tilbage til nye synteser. Processen fortsætter i indtil flere omgange, hver gang med ny viden og gradvise forbedringer. Figuren ovenfor sammenfatter princippet.



- ▲ Krystal af halvleder-materialet ruthenium-antimonid (RuSb_2), der er et termoelektrisk materiale. Termoelektriske materialer kan producere elektricitet direkte ud fra varme, tilsvarende hvad solceller gør ud fra lys. De kan også bruges som køle-elementer. Til studierne af de grundlæggende mekanismer bag disse egenskaber er det nogle gange nødvendigt at syntetisere en ren, veldannet og stor krystal. Det er ikke helt nemt.

SYNTESER AF MATERIALER

I dette afsnit præsenteres nogle af de syntesemetoder, der ofte bruges inden for uorganisk materialekemi. En del af dem adskiller sig markant fra brugen af bægerglas og kolber, som kendes fra andre grene af kemien. Syntesemetoderne bruges bredt i universitetsforskning over hele verden, men genfindes også i industrien. Her indgår de i fremstillingen af tusindvis af produkter, der i sidste ende havner ude i butikkerne og hjemme hos os selv.

Inden for uorganisk materialekemi arbejder man også en del med kolber, reagensglas og opløsninger, som man kender det fra alle grene af kemien. Et eksempel er simple fældningsreaktioner, hvor opløste metalsalte reagerer og danner faste stoffer i form af partikler, der synker til bunds i bægerglasset. Med de

rette tiltag kan partiklerne gøres små (f.eks. nanopartikler) eller dyrkes til store, flotte krystaller. Der er imidlertid også en række andre og lidt mere usædvanlige synteseformer i spil.

Her præsenteres nogle få af dem:

HØJTRYKS-SYNTESE

Det er velkendt, at en høj temperatur kan sætte gang i kemiske reaktioner. Mindre velkendt er, at man også kan bruge højt tryk. Virkelig højt – nogle gange flere hundredtusinde atmosfærer. Det er samme tryk som man finder knap tusind kilometer nede i jorden. Højtryks-syntese kan derfor frembringe materialer, der aldrig ville opstå af sig selv på jordoverfladen. Et velkendt eksempel er diamanter, der kun dannes naturligt nede i jorden under høje tryk og temperaturer. Mange højtryksmaterialer har imidlertid helt ukendte strukturer og giver f.eks. ny indsigt i de kemiske reaktioner, der foregår hvert øjeblik langt under vores fødder. Det hjælper geologer til at opnå ny viden om vores klode.



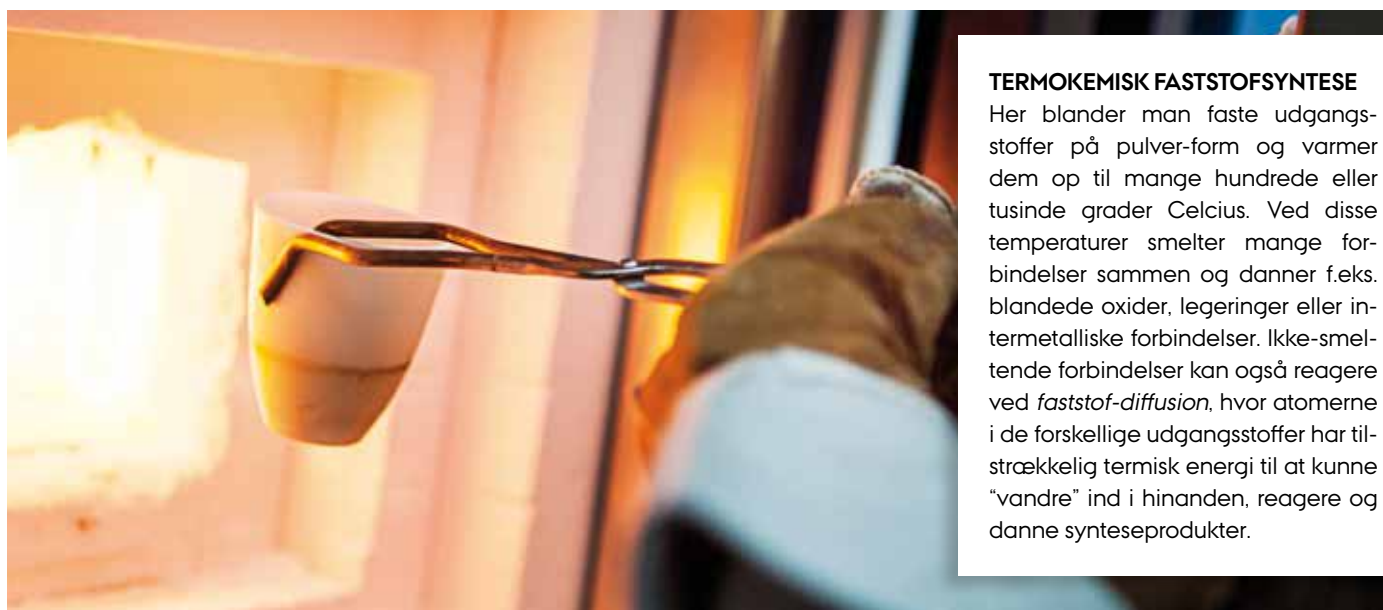
SOLVOTERMAL SYNTese

Solvotermal syntese kaldes populært "syntese ved trykkogning". Det er dybest set almindelig vådkemisk syntese flyttet fra bægerglas over i højtryks-reaktorer, hvor man kan hæve temperaturen til langt over det normale kogepunkt for det opløsningsmiddel, man bruger. Reaktionsblandingen er en simpel opløsning af ionforbindelser (metal-salte). Ved reaktionen, der iværksættes af varmen, dannes bittesmå partikler af det materiale, der er produktet. Partiklerne flyder frit rundt i opløsningsmidlet – dette kaldes for *suspension*. Normalt synker de dog langsomt til bunds. Selve syntesen kan foregå portionsvist i små reaktorer kaldet *autoklaver*, eller mere avanceret i flow-reaktorer, der tillader en "samlebåndsproduktion". Begge metoder bruges ofte til fremstilling af nanopartikler.



MEKANO-KEMISK SYNTese

Denne syntesemetode forlader sig på fysiske kræfter til at iværksætte kemiske reaktioner. Her foregår syntesen i lukkede beholdere af specialstål eller ultrahård keramik. I beholderne placerer man pulvere af udgangs-kemikalierne samt nogle kugler af samme hårde materiale som beholderne selv. Man spænder herefter beholderne fast i en maskine kaldet en *kuglemølle*. Møllen slynger beholderne rundt i kontrollerede baner, hvilket får kuglerne indeni til at kolliderer intenst med hinanden, væggene og de kemiske stoffer, de er omgivet af. Trykpåvirkningen i kontaktpunkterne kan være høj nok til, at en kemisk reaktion sættes i gang og at udgangsstofferne over tid omdannes til reaktionsprodukter.



TERMOKEMISK FASTSTOFSYNTese

Her blander man faste udgangsstoffer på pulver-form og varmer dem op til mange hundrede eller tusinde grader Celcius. Ved disse temperaturer smelter mange forbindelser sammen og danner f.eks. blandede oxider, legeringer eller intermetalliske forbindelser. Ikke-smeltende forbindelser kan også reagere ved *faststof-diffusion*, hvor atomerne i de forskellige udgangsstoffer har tilstrækkelig termisk energi til at kunne "vandre" ind i hinanden, reagere og danne syntese produkter.

MIKROBØLGE-SYNTESE

Mikrobølge-syntese er i princippet en variation over termokemisk syntese, hvor man bruger mikrobølger til selve opvarmningen. Det gør det muligt at opnå meget høje temperaturer - flere tusind grader - ekstremt hurtigt. Mikrobølger omsættes meget direkte til varme via interaktion med de kemiske bindinger i reaktionsblandingen. Det gør, at energien afsættes meget "målrettet". Man kan i nogle tilfælde på få minutter fremstille forbindelser, der ved almindelig termokemisk syntese ville tage mange timer, eller endda være næsten umulige at lave. Dette fortrin gør mikrobølgesyntese interessant for industrien, da det er en billig og nem måde at drive en højtemperatur-proces.



FORBRÆNDINGS-SYNTESE

Denne syntesemetode bruges til fremstilling af bl.a. metal-oxider gennem en forbrændingsreaktion. Syntesen foregår ved opvarmning af en opløsning, der indeholder forskellige metalsalte, og som er tilsat et brændsel. I det opløsningen koger tør, antændes brændslet, og forbrændingen driver så en kemisk reaktion imellem metalsaltene, som bliver til syntese produkter. De kan for eksempel være metalliske legeringer eller keramik med høj renhed, korrosionsbestandighed ved høj temperatur eller ekstrem hårdhed (*super-hardness*.)





KRYSTALLOGRAFI

– HVAD ER STRUKTUREN?

"Krystallografi" betyder "beskrivelse af krystaller". Krystallografien er et analyseværktøj – et af de allervigtigste, materialekemikere råder over. Den er et kighul ind i atomernes verden. Krystallografiske metoder afslører atomers positioner i forhold til hinanden, og hvordan deres kemiske bindinger er indrettet. I afsnittet lærer du noget om det teoretiske grundlag for krystallografi og også dele af den praktiske udførelse i forskellige typer af målinger.

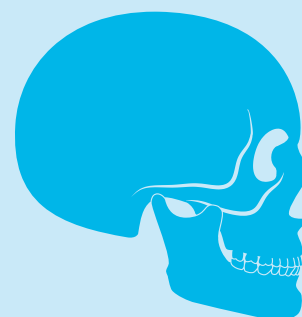
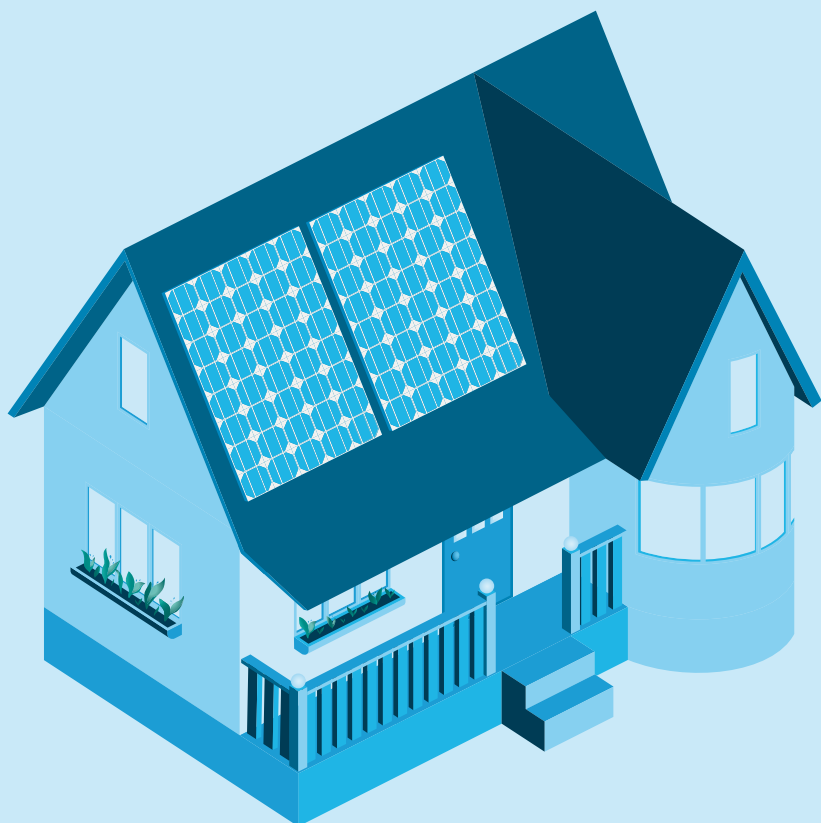
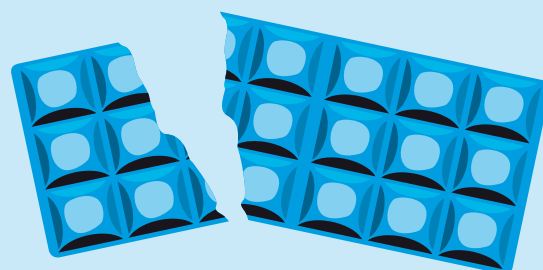
Når et materiale først er syntetiseret, er næste trin at afdække dets struktur. Her er *krystallografi* et af de mest informative og tværgående værktøjer der findes. Indsigten, man vinder, er nemlig meget fundamental: Det er de enkelte elektroner i materialet, som stedbestemmes. Da de fleste elektroner er bundet omkring atomkerner, afslører dette atomernes placeringer og derfor "rygraden" i hele strukturen. Men elektroner er meget mere end det: De er "kemiens lim", essensen af alle de kemiske bindinger, der holder vores verden sammen. Krystallografi giver os mulighed for at studere bindingerne direkte i alle deres mange aspekter. Fremgangsmåden beskrives om lidt.

Det eneste krav selve anvendelsen af krystallografi stiller til materialet er, at strukturen skal være velordnet. Atomerne skal med andre ord sidde "pænt" i et 3D-gitter, der kaldes "iongitteret" eller "krystalgitteret". Navnet skyldes, at velordnet struktur netop er dét, vi i daglig tale kalder en "krystal". Man siger også, at "strukturen er krystallinsk", og dette gør sig gældende for stort set alle uorganiske materialer.

Selve gitteret består af et grundlæggende mønster af atomer kaldet *enhedscellen*, som gentages igen og igen i alle tre dimensioner, og til sidst udspænder det materiale, vi både kan se og røre ved. Enhedscellen indeholder den fulde symmetri af strukturen. Dens gentagelse i alle retninger medfører derfor, at krystallinske materialer besidder en orden, der rækker fra den ene ende af strukturen til den anden. Man kalder det "langt-rækkende orden".

Krystallinitet er et ufatteligt udbredt arrangement – ikke kun for de materialer, vi er vant til at tænke på som "krystaller", såsom smykkesten. Tænk for eksempel på et hus. I et hus er alle murstenene krystallinske. Det samme er cementen, teglstenene, stålet i ståldragere eller armeringsjern, solcellerne på taget, endda (delvist) træet i gulve og bærebjælker. Alt metallet i ens cykel (eller bil, eller bus, eller tog, eller fly) er krystallinsk – og forskningsmæssigt nøje tilpasset og udvalgt, så det har præcis de egenskaber, der kræves mht. styrke, elasticitet, sejhed, hårdhed, osv. Keramikken i et kaffekrus, en tekop eller tallerken er krystallinsk. Det samme er stort set alle mineraler. Dine knogler og tændernes emalje indeholder også store mængder krystallinsk materiale: Mikro- og nanokrystaller af materialet hydroxy-apatit (en ionisk fosfat-forbindelse af calcium). Tandemaljen er faktisk 96% uorganisk, krystallinsk materiale – et såkaldt bio-mineral. Derfor er emaljen så hård. Chokoladen, man spiser med selv samme tænder, har også krystalstruktur. "Grå", gammel chokolade opstår som et gradvist struktur-skift fra én krystalform til en anden; kulinarisk værdi kan således også beskrives materialekemisk. Selv papir og mange plantematerialer er delvist krystallinske.

Årsagen er, at den krystallinske konstruktion fra naturens hånd ofte udgør den mest optimale "pakning" af atomer.



Vi har flere krystaller omkring os i dagligdagen, end vi drømmer om. En "krystal" er grundlæggende blot et materiale med en velordnet, periodisk struktur på det atomare plan. Begrebet er derfor langt bredere, end hvad vi normalt forstår ved "krystaller", såsom f.eks. smykkesten.

KRYSTALLOGRAFI I PRAKSIS

Her og på de følgende sider får du en lille introduktion til, hvordan man i praksis benytter krystallografi, og et begyndende indblik i den dybere viden, den giver adgang til.

I fysikundervisningen i gymnasiet er der et eksperiment med en laserpointer, et gitter og ca. 5 lyspletter på en væg. Lyspletterne er resultatet af konstruktiv og destruktiv interferens, der opstår idet laserstrålen brydes igennem gitteret. Når man har et materiale, og ønsker at kende strukturen, benytter materialekemikere samme slags eksperiment, men udnytter at gitteret ikke behøver at være et 2D-gitter – det kan også være et 3D-gitter. En krystal, dvs. ethvert krystallinsk materiale, er netop sådan et 3D-gitter.

Spredningsfænomenet fra krystallinske materialer kaldes for diffraktion. Det laves ikke med en laser, men derimod med monokromatisk røntgenstråling, dvs. en røntgenstråle der består af én, veldefineret bølgelængde (tilsvarende laseren). Det, at man har et 3D-gitter, betyder, at man ikke længere har blot en håndfuld diffraktionspletter, ligesom i laser-eksperimentet. Man har en hel stjernehimmel og får endnu flere, efterhånden som man vender og drejer krystallen. Hvert sæt af "stjerner" kaldes også for et diffraktionsmønster, og de individuelle lyspletter kaldes reflekser.

I løbet af blot én enkelt krystallografisk måling registrerer man mange tusind reflekser. Deres kombinerede positioner og inten-

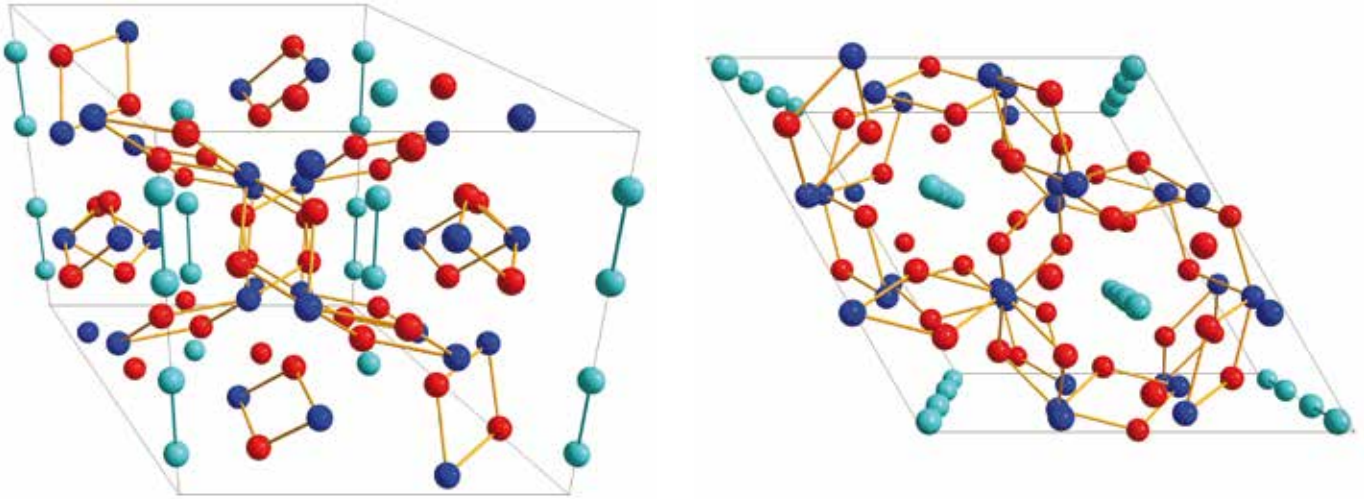
siteter er et unikt datagrundlag, som en computer efterfølgende kan omsætte til et præcist billede af, hvordan gitteret ser ud – i alle 3 dimensioner.

Etableringen af krystalgitteret er i sig selv baseret på en præcis stedsbestemmelse af alle elektroner i strukturen. For en kemiker er det imidlertid valens-elektronerne, der er de mest interessante, da det er dem, der danner kemiske bindinger. Inden for materialekemi ligger krystallografiens store værdi netop i dens evne til at "se" elektroner og direkte visualisere de kemiske bindinger.

Værktøjet, der her tages i brug, kaldes for *elektrontæthedsanalyse*.

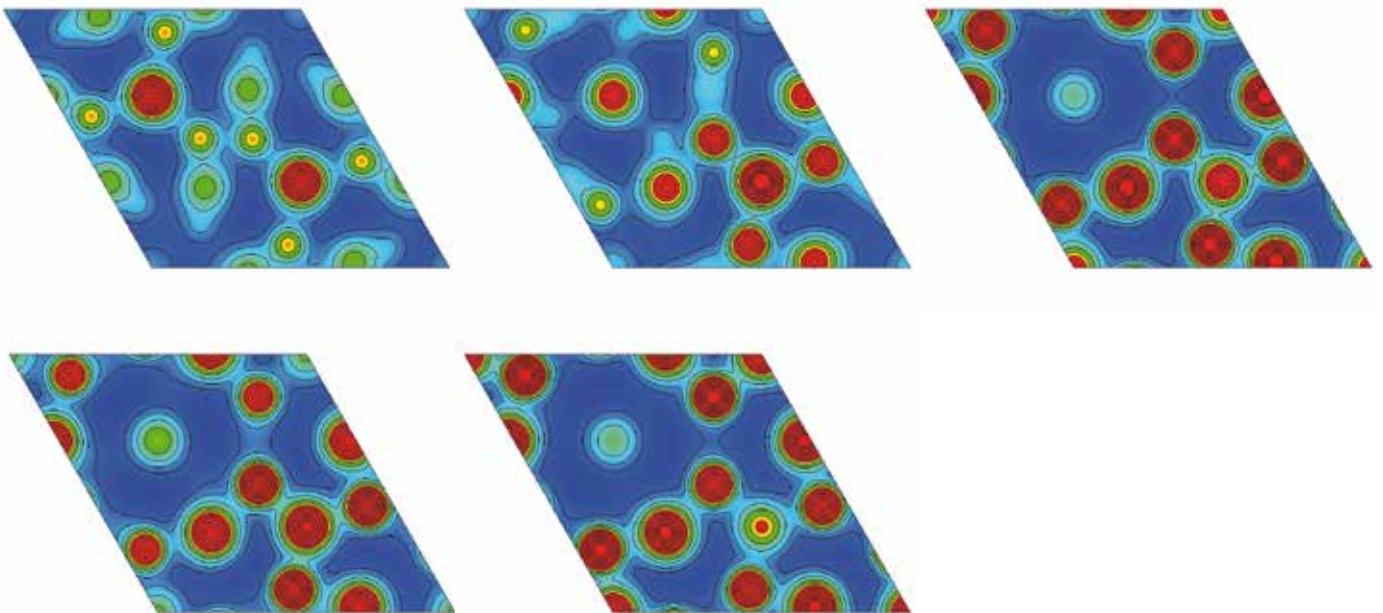
Ordet "elektrontæthed" hentyder til den rumlige koncentration af elektroner lokalt i enhedscellen – altså i hvert eneste lille udsnit, man måtte ønske at betragte. For at skabe et overblik, skærer man typisk enhedscellen i tynde skiver og studerer så hvert udsnit for sig. Elektrontæthederne vises dermed i 2D ved hjælp af en farveskala, og/eller på samme måde som højde-kurver vises på et landkort. 3D-elektrontætheder bliver hurtigt alt for komplicerede at gennemskue og arbejde med.

● Antimon ● Antimon ● Zink



Modeller: Anders B. Blichfeld

- ▶ Enhedscellen af det termoelektriske materiale zink-antimonid, $\text{Zn}_{3,83}\text{Sb}_{3,17}$, vist fra forskellige vinkler. Krystalstrukturer kan ofte synes uoverskuelige, men kun indtil enhedscellen vendes på den rigtige måde. De røde atomer er zink (Zn), de blå og turkis atomer er begge antimon (Sb). Antimon vises med to forskellige farver, fordi det krystallografisk set er to separate typer af positioner i strukturen, atomerne optager. Bemærk hvordan alle atompositioner langs enhedscellens kanter og "overflade" passer perfekt med at næste enhedscelle fører strukturen videre, som Lego-klodser der sættes sammen. Det gælder i alle retninger. Hvert af de turkis antimon-atomer langs kanterne deles f.eks. mellem 4 enhedsceller. Prøv at gennemskue hvordan.



Modeller: Sebastian Christensen

- ▶ Her er vist fem elektrontæthedskort tilhørende enhedscellen for $\text{Zn}_{3,83}\text{Sb}_{3,17}$. Det første hører til "forsiden" af enhedscellen, som vist her ovenfor – du kan sikkert genkende mønsteret. De næste fire er parallelle snit, som ligger gradvist dybere og dybere i enhedscellen (ind i papirets plan). For hvert af dem er man dykket med en afstand tilsvarende 2.5 % af cellens fulde dybde. Prøv at se, om du kan genfinde atomerne fra 3D-strukturen.

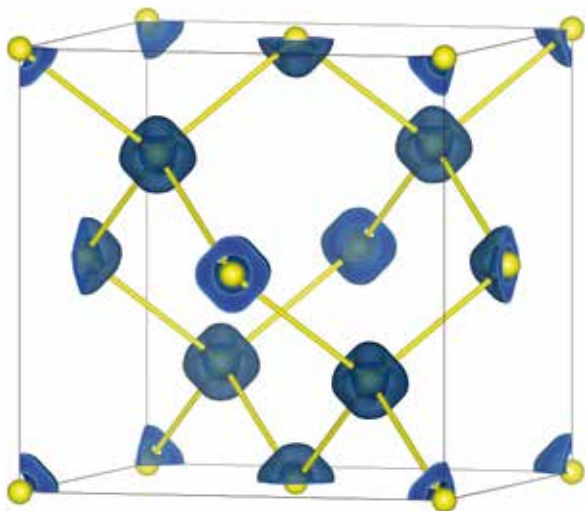
Man finder altid en høj elektrontæthed omkring alle atomkerner. Det skyldes de mange kerne-elektroner, som er bundet dér. Det virkelig interessante er derimod alle områderne mellem atomkernerne. Her afslører en høj elektrontæthed enten:

- 1 Tilstedeværelsen af en kemisk binding mellem atomer, eller
- 2 Ikke-bindende elektroner tilknyttet et enkelt atom (også kaldet et lone-pair)

Begge dele er lige interessant at få klarlagt, men elektrontætheds-kortene fortæller meget, meget mere. De viser f.eks. hvor stærk en binding er – altså om der er tale om enkeltbinding, dobbelt- eller tripelbinding, eller et "skævt" tal derimellem (kemisk bindingsstyrke er faktisk en flydende størrelse, der kan variere frit). Samtidigt fremgår det, hvor polariseret hver bin-

ding er, dvs. indflydelsen fra elektronegative atomer i strukturen. Hermed kan man gennemskue, om en binding er overvejende ionisk eller kovalent. Man ser også tydeligt afstanden imellem nabo-atomer og vinklerne imellem alle bindinger, hvilket bl.a. fortæller om de intermolekylære kræfter, der hersker i materialet. Den slags kræfter/interaktioner er afgørende for den fysiske stabilitet af alle stoffer, herunder deres smelte- og kogepunkter. Elektrontæthederne kan også hjælpe til at konkretisere magnetiske vekselvirkninger – hvordan elektroner tilhørende forskellige atomer i et materiale "snakker sammen" og formidler magnetiske effekter.

Al denne viden, og mere til, kan gøres tilgængelig for enhver kemiker – når som helst det er muligt at fremstille en krystal af det stof, man arbejder med.

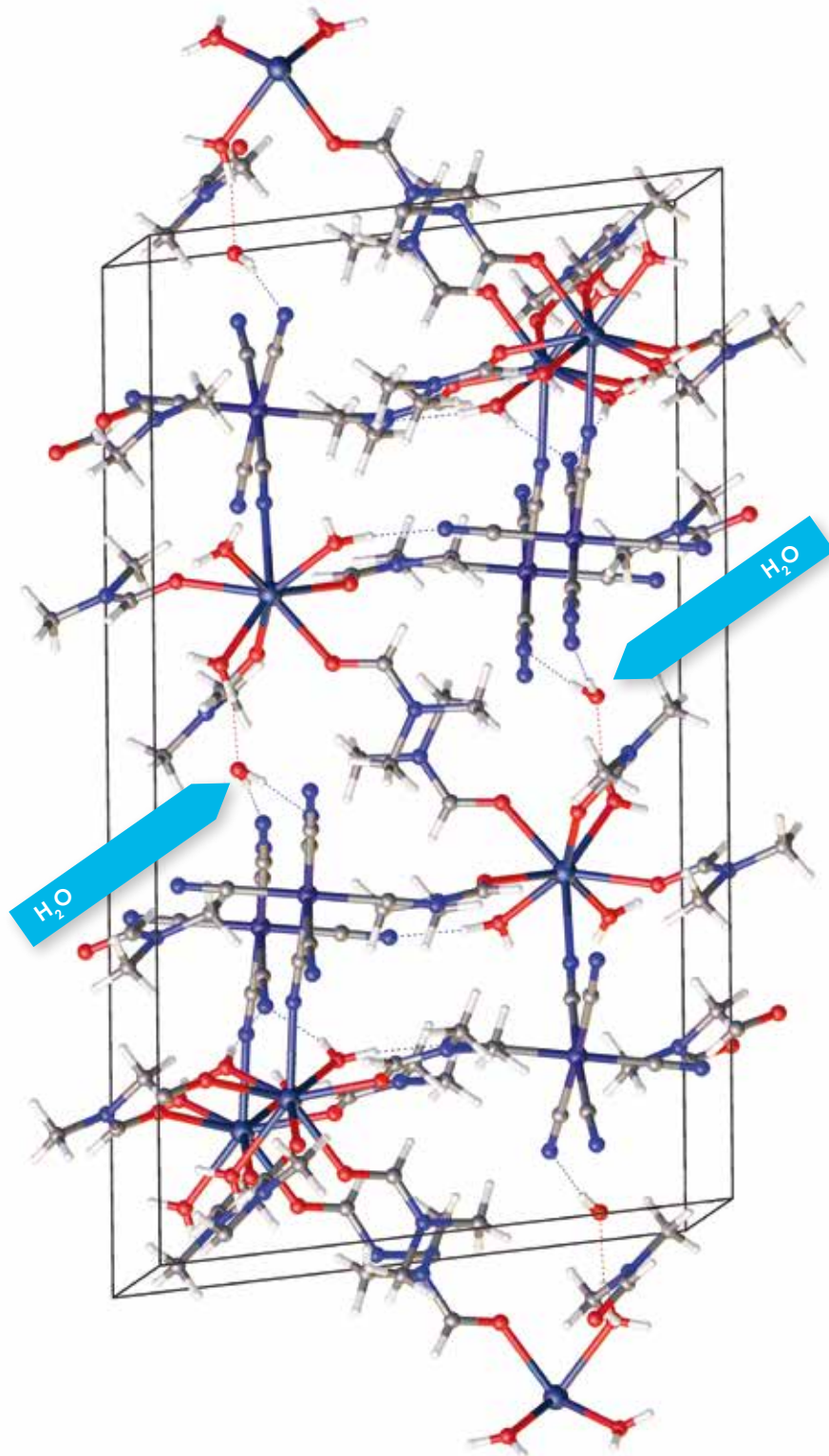


Model: Niels Bindzus



Foto: Colourbox

- ▲ Når man har fortolket elektrontætheds-kortene i 2D, kan man efterfølgende rekonstruere udvalgte elementer af strukturen i 3D. Her ses f.eks. enhedscellen for diamant, hvor man har valgt at fokusere på de inderste af kerne-elektronerne, der omgiver hvert kulstofatom. Eftersom kerneelektroner aldrig indgår i kemiske bindinger, har den gængse opfattelse blandt kemikere over hele verden været, at netop disse elektronskyer altid måtte være kuglerunde. Det er imidlertid ikke helt sandt – og beviset er de blå "skygger" i figuren, der er baseret på ekstremt nøjagtige krystallografiske data, og som repræsenterer afvigelsen fra kuglerund. Denne nye, grundlæggende indsigt stammer faktisk fra Danmark – fra Aarhus Universitet. Hvad den fortæller os er, at valenselektronernes (og de kemiske bindingers) tilstedeværelse rent kvantemekanisk kan "mærkes" meget længere ind i atomerne end hidtil antaget. Selv helt inde blandt kerneelektronerne.



Model: Lai-Chin Wu

- ▲ Her ses en enhedscelle af det foto-magnetiske materiale $[Y(DMF)_4(H_2O)_3(\mu-CN)Fe(CN)_6] \cdot H_2O$, hvor "DMF" står for dimethylformamid, altså $(CH_3)_2NC(O)H$. Man har i dette tilfælde valgt at interessere sig for de hydrogenbindinger, elektrontætheds-analysen har afsløret imellem molekylerne i strukturen. De er vist med de stiplede linjer. Midt i enhedscellen ses f.eks. to vandmolekyler, der er låst i strukturen som krystalvand; deres hydrogenbindinger til naboatomerne ses tydeligt.

Et foto-magnetisk materiale har den særlige egenskab, at det er magnetisk, så længe det udsættes for lys. Fænomenet er ret interessant både teknologisk og for grundforskningen. Hvad angår $[Y(DMF)_4(H_2O)_3(\mu-CN)Fe(CN)_6] \cdot H_2O$ skabes effekten af lys omkring bølgelængden 375 nm. Årsagen er, at bestemte elektroner i materialet her exciteres til højere energi-tilstande, hvilket direkte påvirker en række af de kemiske bindinger i strukturen. Herved opstår en ny struktur – som kun lever, så længe lyskilden er tændt. Dette krystallografiske eksperiment er på ingen måde simpelt. Det virkelig komplicerede skridt er imidlertid at sammenkæde den magnetiske effekt til den exciterede struktur.

ENKRYSTALLER OG PULVERE

Der er to dominerende målemetoder inden for krystallografi. Den ene kaldes for enkeltkrystal-diffraktion og den anden for pulver-diffraktion. Her kommer du til at lære lidt om begge, samt de måleinstrumenter man bruger - "diffraktometre"

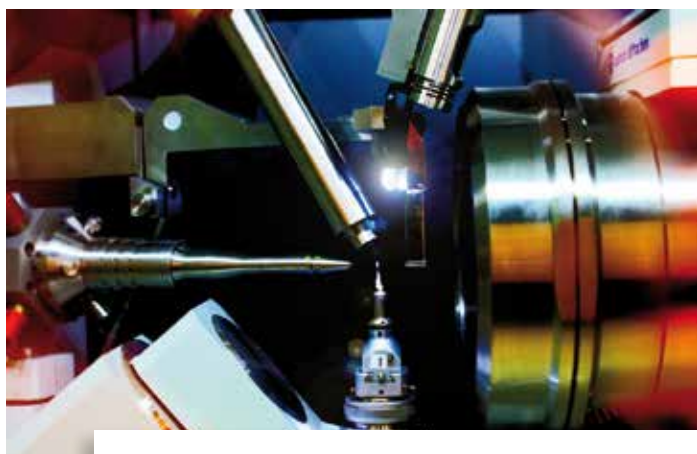


Foto: HV Lukks



Foto: Espen Eiebrand

ENKRYSTAL-DIFFRAKTION

Enkrystal-diffraktion benyttes især, når man vil finde strukturen af et nyt, ukendt materiale. Metoden bruger en enkelt, veldannet krystal af stoffet, som regel ca. 0,3 mm stor. Diffraktionen kommer ud som enkeltstående, skarpe stråler der giver et diffraktionsmønster på diffraktometerets detektor (et røntgenkamera). På billedet ovenfor er detektoren den store, cylinderformede komponent til højre. Den monokromatiske røntgenstråle kommer ind fra venstre gennem det lange, smalle rør (kaldet en kollimator). Selve prøven - krystallen - er den lille, hvide plet der sidder i centeret af opstillingen, umiddelbart ud for munden af kollimatoren. Krystallen er monteret på en lille nål af glas, som igen er fastgjort (nedadtil) på diffraktometerets *goniometer* - en motoriseret "robot-arm", der kan vende og dreje krystallen på utallige måder, til meget præcise vinkler, uden at den forlader røntgenstrålen. Dermed kan det udnyttes, at man blot ved at rotere krystallen en smule får skabt et nyt diffraktionsmønster - fordi andre dele af krystalgitteret nu bringes ind i en position, hvor det kan sprede den indkommende røntgenstråling. Fortsætter man nogle tusind gange til andre, nye positioner, og har man software til at optage placeringer og intensiteter af alle diffraktionspletterne undervejs, kan en computer efterfølgende bruges til at stedbestemme alle elektronerne i materialet.



Foto: HV, Lukkas

PULVERDIFFRAKTION

I pulverdiffraktion måler man på et krystalpulver, dvs. der måles samtidigt på mange tusind bittesmå krystaller af det samme stof. Sådanne små krystaller kaldes også for *krystallitter*. Den kollektive diffraktion gør, at mønsteret på detektoren nu ikke længere er pletter, men derimod ringe, som har den direkte (ikke-spredte) røntgenstråle som fælles centrum. Et pulverdiffraktometer har derfor også normalt en lidt anden indretning end et en-krystal diffraktometer (se foregående side), og dets goniometer er anderledes bygget op. Måleprincippet er imidlertid præcis det samme. Pulverdiffraktion er mindre egnet til at udforske ukendte strukturer, men fantastisk til at analysere egenskaber i allerede kendte materialer. Metoden er hurtig og nem, en måling tager typisk 10 minutter. Den efterfølges af et hurtigt opslag i en database, der straks afslører, om synteseproduktet er det ønskede stof eller noget andet. Det svarer til at tage et "fingeraftryk" af materialet. Yderligere analyse kan afsløre mange overordnede egenskaber ved krystalpulveret, f.eks. størrelsen af krystallitterne, enhedscellens dimensioner, detaljer i krystalstrukturen (atomernes bevægelse, spændinger i krystalgitterne), urenheder, indlejringer af "rivaliserende" krystalstrukturer og meget mere.

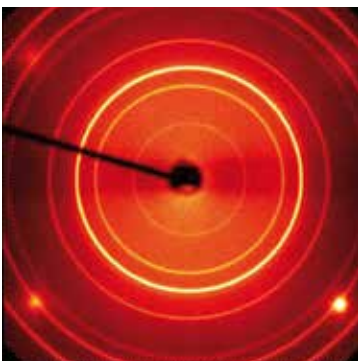


Foto: Henrik Lyder Andersen

KRYSTALSYSTEMER

Dette kapitel er det sidste, der omhandler krystallografi. Det er beregnet til at give dig en forståelse af nogle af de grundlæggende egenskaber ved krystaller generelt, med enhedscellen i fokus. Det giver også et begyndende indblik i hvordan vidt forskellige materialer kan inddeles og kategoriseres efter deres strukturer.

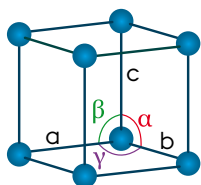
At materialer så villigt danner krystalstrukturer skyldes, at en krystalopbygning er slutproduktet af "optimal" stakning og stabling af atomer. Atomerne i hver enhedscelle forholder sig naturligvis til den kemiske formelenhed for materialet (Fe_2O_3 , MnO_2 , PtPb , $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, CrN , $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$, osv.).

Når man kigger på krystaller i naturlige mineralforekomster, er det tydeligt, at ikke alle materialer krystalliserer ens. Nogle er kubiske, andre er nåleformede, andre igen sekskantede, osv. Hvis man kastede sig ud i et nøje studium af alverdens krystalformer, ville man imidlertid alligevel opdage en række fællestræk. De ses tydeligst, når krystaller er veldannede – dvs. fri for defekter,

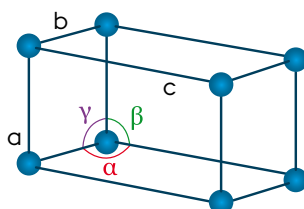
sidevækst eller andet, der maskerer deres naturlige form. Her vil man erkende, at der findes et begrænset antal krystalfaconer.

Dette afspejler to grundlæggende fakta, nemlig (1) at krystalers naturlige form faktisk er en direkte forlængelse af enhedscellens egen facon, og (2) at der er et endeligt antal forskellige enhedsceller – dvs. syv grundlæggende, 3-dimensionelle faconer, de kan antage. Man taler i fagsproget om de syv krystal-systemer. Alle krystallinske materialer i hele verden kan placeres i ét af de syv systemer.

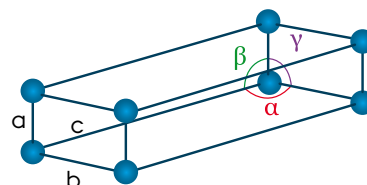
Kubisk [$a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$]



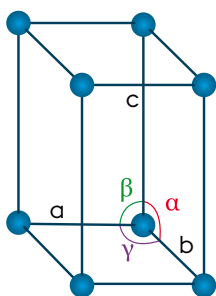
Tetragonal [$a=b \neq c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$]



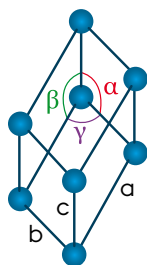
Orthorhombisk [$a \neq b \neq c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$]



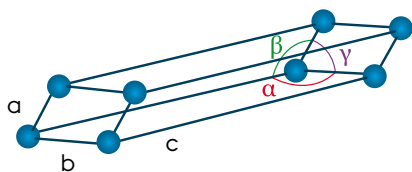
Hexagonal [$a=b \neq c$, $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$]



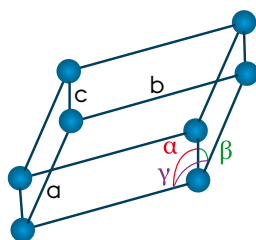
Trigonal-Rhombohedral [$a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$]



Monoklin [$a \neq b \neq c$, $\alpha=\gamma=90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$]



Triklin [$a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$]



SYSTEMERNE ER HER I DERES SIMPLESTE FORM. DE KALDES I FAGSPROGET FOR:

- 1 Det kubiske system**
– enhedscellen er en terning
- 2 Det tetragonale system**
– enhedscellen er en "aflang" terning
- 3 Det ortorombiske system**
– enhedscellen er en "skotøjsæske" (kasse med ulige sidelængder)
- 4 Det hexagonale system** – enhedscellen, set ovenfra, er et udsnit af en sekskant
- 5 Det trigonale system** – enhedscellen er en terning, hvor man har trukket i modstående hjørner
- 6 Det monokline system** – enhedscellen er en kasse med ulige sidelængder og én skæv vinkel ($\neq 90^\circ$)
- 7 Det triklins system** – enhedscellen har ulige sidelængder og lutter skæve vinkler



◀ **Snefnug** er alle variationer over et sekskantet tema, fordi enhedscellen i en iskrystal tilhører det hexagonale krystalsystem. Her lægger enhedscellerne sig sammen til et smukt, sekskantet mønster, som forplanter sig fra atomernes verden og hele vejen op til vores synlige omgivelser.

Mineralet pyrit, også kendt som halvleder-materialet jensulfid, FeS_2 , har en enhedscelle, der tilhører det kubiske krystalsystem. Pyrit er et af de mest udbredte mineraler, vi har på Jorden. Det overvejes derfor ihærdigt, om (og hvordan) dets halvleder-egenskaber måske kunne manipuleres derhen, at materialet bliver anvendeligt til solcelle-fremstilling.

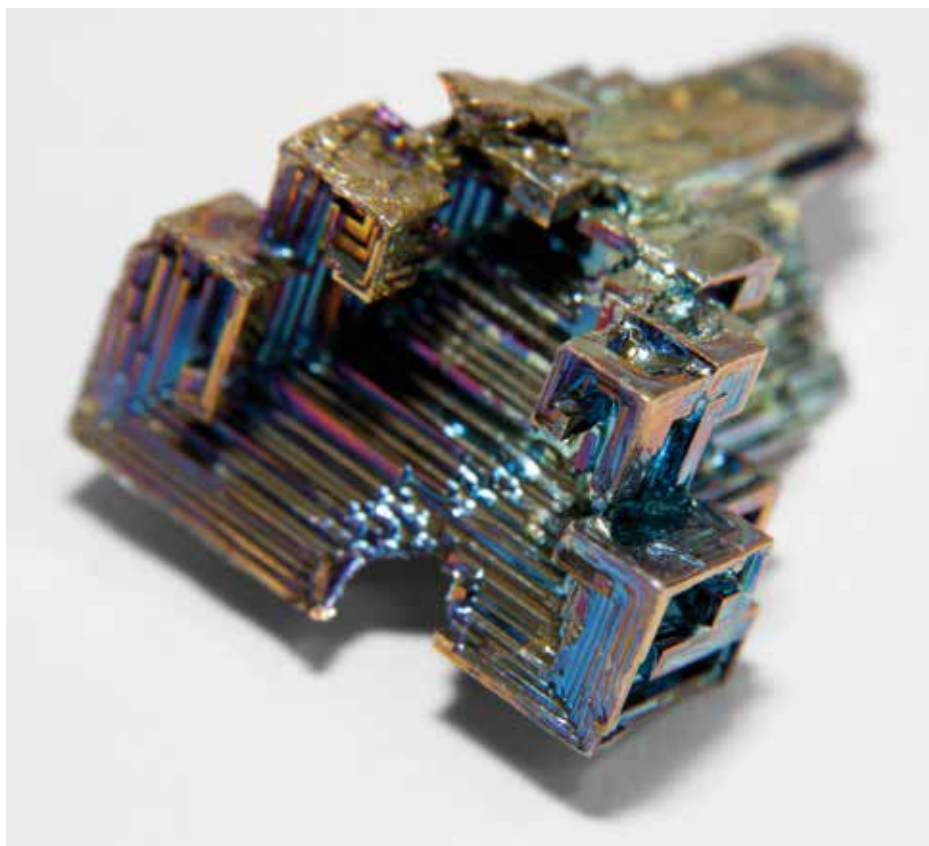


◀ **Almindeligt sukker** er molekylære krystaller, hvor hver enhedscelle indeholder ét glucose-molekyle og ét fructose-molekyle (to forskellige kulhydrater). Deres pakning imellem hinanden gør det monokline krystalsystem mest favorabelt. Sukkerkrystallernes vækst tillader dog sjældent, at man genkender enhedscellens facon i deres endelige form.

Hvilket krystalssystem et givent materiale foretrækker, afhænger af en lang række forskellige faktorer. Meget drejer sig om den kemiske sammensætning – præcist hvilke atomer eller molekyler, der skal finde sig til rette mellem hinanden i strukturen. Det detaljerede billede er imidlertid kompliceret. Det omfatter bl.a. atomernes respektive størrelser (ion-radius), deres elektronegativitet, antallet af dem i enhedscellen, intermolekylære kræfter, inklusion af løst bundne små-molekyler (f.eks. krystalvand) og meget mere. I praksis kan man derfor sjældent forudsige, hvilket krystalssystem et bestemt materiale favoriserer.

Det er også værd at fremhæve, at ét givent stof sagtens kan an-

tage flere forskellige strukturer. Inden for samme kemiske formel er der altså plads til adskillige krystalformer. Hver af dem er et materiale i sig selv med særegne, unikke egenskaber. Strukturelle forskelle betegnes ofte med græske bogstaver foran den kemiske formel. Aluminium oxid kan f.eks. findes som $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, en trigonal struktur, der også er grundlaget for smykkestenene safir og rubin, men også som $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ og $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$, der begge er kubiske og utroligt vigtige inden for katalysator-teknologi. Ydermere findes bl.a. $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ (hexagonal), $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ (monoklin) og $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ (ortorombisk). Under ét kalder man sådanne strukturvarianter for krystalfaser eller polymorfer.



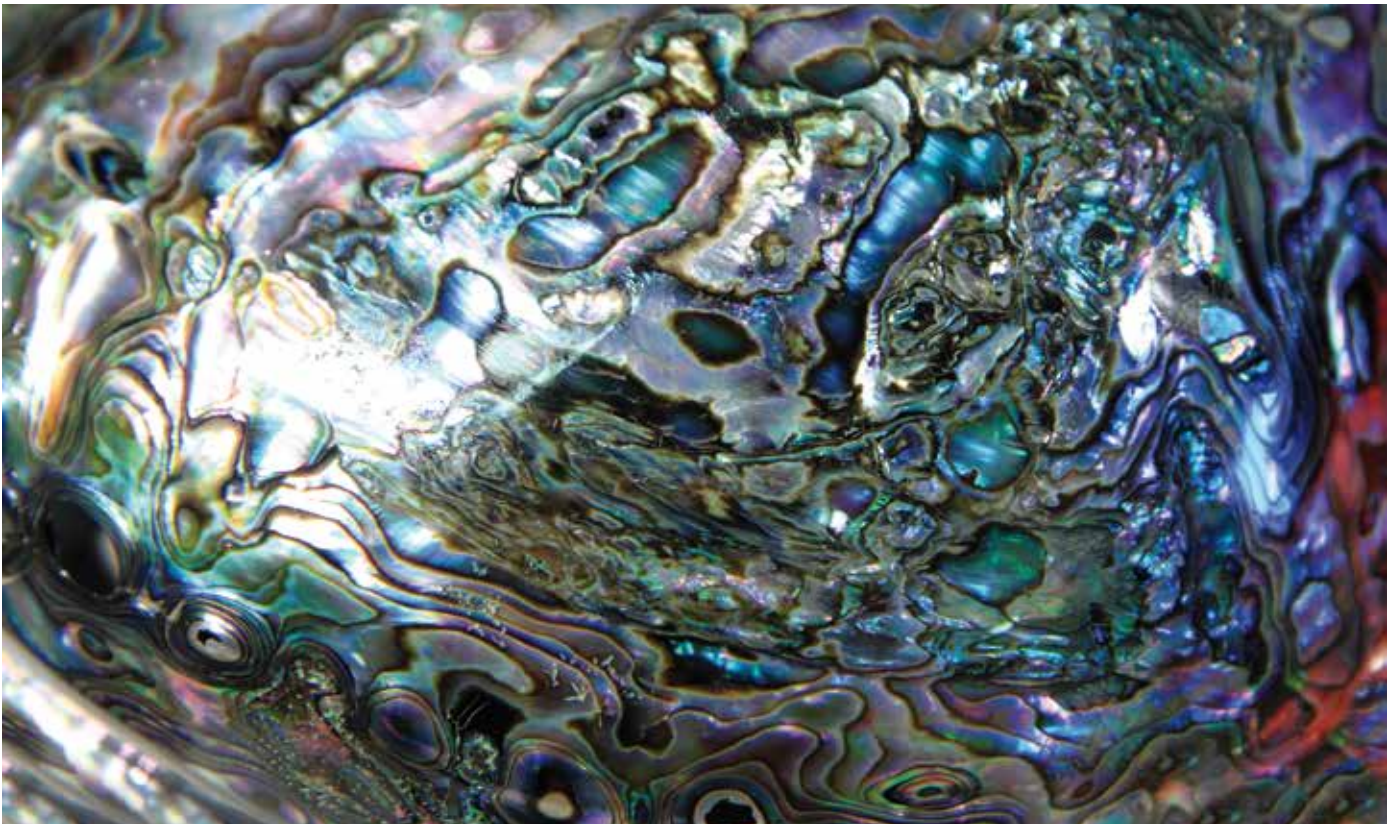
- ◀ Grundstoffet bismuth ($Z = 83$) er et metal og har ligesom alle andre metaller en krystalstruktur. Overvejer man krystalssystemet, har man imidlertid her et glimrende eksempel på, at skindet kan bedrage. Dømt efter krystalfacetterne og deres vækst ville man forvente en enhedscelle med rette vinkler i alle hjørner. I virkeligheden er bismuths struktur trigonal – så alle hjørnevinklerne er godt nok ens, men de er ikke 90° . Sådanne kontra-intuitive krystaller kaldes for "pseudo-kubiske". Udseendet skyldes et usædvanligt vækstfænomen, hvor krystallernes kanter vokser hurtigere end deres overflader. Resultatet er en masse kanter omkring "udhulede" midterområder.



- ▲ Kobbersulfat pentahydrat, $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, danner krystaller i det triklone krystalsystem. Hvis man fjerner krystalvandet, medfører det imidlertid en krystalfase-overgang fra triklin til ortorhombisk struktur. Samtidigt skifter stoffet farve: Vandfrit CuSO_4 er kridhvidt. I dette tilfælde spiller vandmolekylerne altså en kritisk rolle for, hvilket krystalsystem, stoffet foretrækker, samt for dets optiske egenskaber.



- ▲ Stoffet menthol bruges som smags giver i f.eks. slik og tyggegummi. Naturligt menthol på fast form har en trigonal krystalstruktur og går under betegnelsen α -menthol. Menthol-molekylet eksisterer imidlertid i to spejlbilledformer (isomerer), og α -menthol er her blot én blandt 4 krystalformer af "venstrehånds-isomeren", *L*-menthol. Benytter man i stedet en racemisk blanding af de to isomerer, *DL*-menthol, får man overraskende nok krystaller tilhørende det triklone krystalsystem. Dette er blot ét eksempel på den afgørende rolle, isomeri kan spille for strukturen af molekyllære krystaller. Dette er aktuelt f.eks. for lægemidler, der ofte er krystallinske forbindelser, og hvor kroppens optag af stofferne kan afhænge kritisk af hvilket krystalsystem, de tilhører.



- ▲ Perlemor findes inden i nogle muslinger, og dets fantastiske farvespil skyldes et arkitektonisk mesterværk fra naturens side. Det består af calcium karbonat, CaCO_3 , som muslingerne imidlertid syntetiserer selektivt i den ortorhombiske krystalform kaldet "aragonit". Krystallerne dannes som små "fliser", der siden samles imellem hinanden med organiske molekyler, lidt ligesom mørtlen i et klinker-gulv. Ansamlingerne ordnes ovenpå hinanden, lag på lag, i tusindvis. Farvespillet opstår, når lys brydes ned gennem alle lagene.

Muslingernes kunststykke er imidlertid endnu større: Ydersiden af skallen er også et samspil af CaCO_3 og organisk materiale, men her er karbonaten syntetiseret selektivt som den trigonale krystalform "calcit". Man har altså én krystalform af CaCO_3 på ydersiden og en anden på indersiden. Dette er blot ét lille eksempel fra det store forskningsfelt, der hedder *bio-uorganisk materialekemi*: Levende væsners udnyttelse af uorganiske materialer i naturen. Tænk blot på knogler, tand-emaalje, gevirer og alverdens koralrev.

FRA STRUKTUR TIL EGENSKABER

I dette afsnit vil du lære om nogle af de vigtigste målemetoder og teknikker, som materialekemikere benytter sig af sideløbende med krystallografi. Formålet er at afdække bestemte materiale-egenskaber, som strukturen bagefter skal holdes op imod. Det er essentielt at kende egenskaberne, da det er dem, der i sidste ende er afgørende for, om materialerne kan løse teknologiske problemer og gavne vores samfund.

Fordi den uorganiske materialekemi spænder så bredt, er det ikke nogen simpel sag at lave en hel og sammenfattende bestemmelse af alle egenskaber i et materiale. Der er utroligt mange forskellige måleteknikker, der kan bringes i spil. Det er derfor vigtigt at man omhyggeligt udvælger de, der er relevante for det formål, man har med sin forskning. Ellers kommer studiet af hvert eneste synteseforsøg til at tage en evighed, og man står til sidst med en masse overflødige data, som ikke betyder noget for den konklusion, man prøver at drage.

Så hvad er der at vælge imellem?

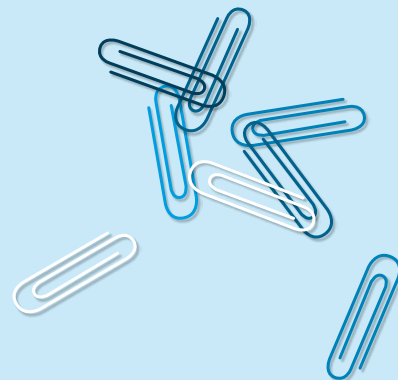
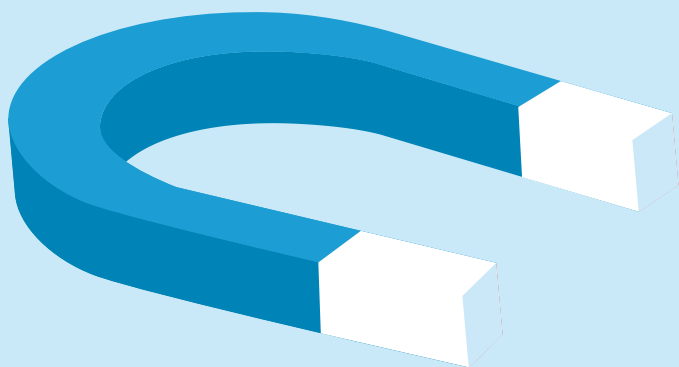
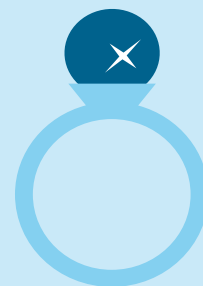
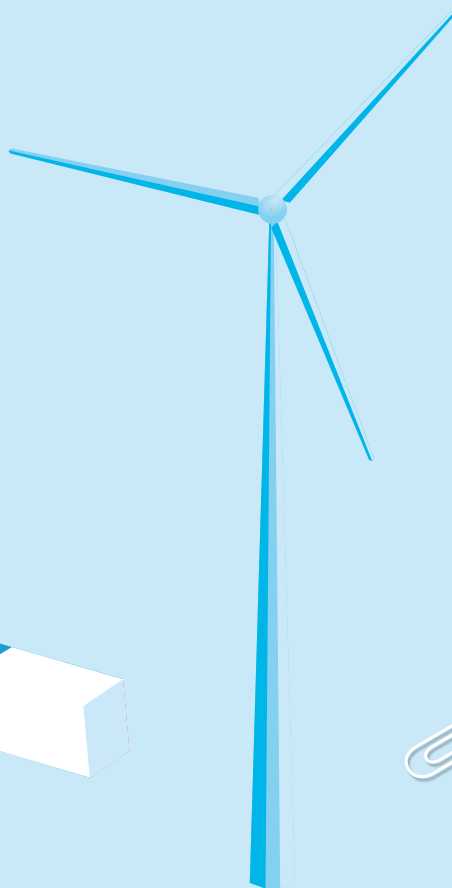
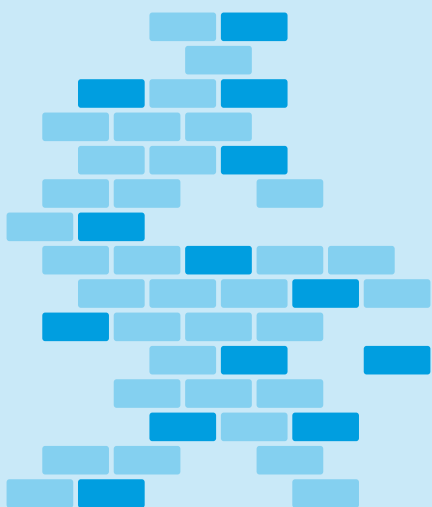
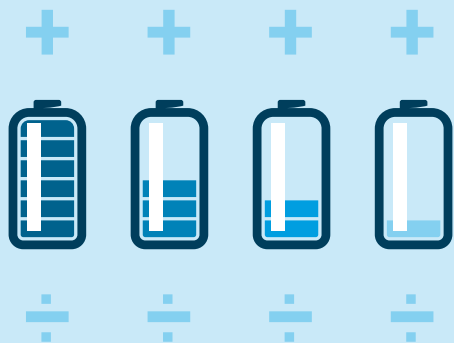
Oftentimes vil man være interesseret i måling af fysiske egenskaber. Det kan f.eks. være den elektriske ledningsevne, varmeledningsevnen eller mekaniske egenskaber såsom hårdhed, brudstyrke eller elasticitet. Andre fysiske egenskaber er mere komplicerede størrelser, f.eks. magnetisk respons eller termokraft. Sidstnævnte er et eksempel på en *halvleder-egenskab*. Mange moderne materialer er halvledere – hvilket vil sige, at deres elektriske ledningsevne befinder sig i gråzone-området imellem en leder og en isolator. Halvleder-materialer spiller en kolossal rolle i vores teknologi, hvor de er grundlaget for alt lige fra LED lysdioder til solceller og oceaner af computerteknologi.

Præcist "hvor meget halvleder" et givent materiale er, kan kontrolleres kemisk. Det vil ofte involvere tilsætning af andre grundstoffer i små mængder – en procedure kaldet *dotering* (eller "doping" på engelsk). Dette bringer endnu en type målinger i spil, nemlig *grundstof-analyse*. Man søger altså at opklare præcist hvilke grundstoffer, der faktisk findes i materialet – og hvor

meget der er af dem (= kvantificering). Det gælder uanset om det er grundstoffer, man forventer, skal være der, eller en uønsket forurening. I sidstnævnte tilfælde er det ekstremt vigtigt at man opdager det i tide. Urenheder afsløres ikke altid i krystallografiske målinger.

Uorganiske materialekemikere benytter sig også af spektroskopi, f.eks. med infrarødt lys (*IR-spektroskopi*) eller ultraviolet og synligt lys (*UV-VIS spektroskopi*). Infrarødt lys aktiverer vibrationer imellem atomer og internt i molekyler. Dette kan f.eks. afsløre kemiske grupper der er bundet på overfladen af materialer (ketoner, carboxyl-syrer, alkoholer, alkaner, etc), samt hjælpe med at identificere hvad materialet er – igen netop i overfladen. Synligt eller ultraviolet lys kan ekscitere valens-elektronerne omkring atomer, og derfor afdække hvor hårdt de er bundet i materialet. Det er vigtigt f.eks. for solceller, hvor UV-VIS spektroskopi bliver en "stedfortræder" for solens lys. Afsløringen af hvor let elektroner eksiteres er afgørende for, om der kan skabes en elektrisk strøm – og dermed om materialet overhovedet kan bruges til solceller.

Tit har uorganiske materialekemikere at gøre med partikler, f.eks. nanopartikler, eller *porøse materialer* – dvs. materialer gennemtrængt af et netværk af meget små kanaler, man gerne vil kende beskaffenheden af. Begge typer materialer analyseres med *porosimetri*. Her måler man bl.a. det specifikke overfladeareal – dvs. den frie overflade af partikler eller kanaler målt i m^2 som man har pr. gram materiale (enhed m^2/g). Enkeltvis har nanopartikler godt nok kun et overfladeareal på ca. $10^{-8} m^2$, men 1 enkelt gram rummer så vanvittigt mange partikler, at det samlede areal nemt ender i størrelsesordenen $100-1000 m^2$.



Alle uorganiske materialer, vi har omkring os i dagligdagen, er resultatet af en forskningsindsats og omhyggelig tilpasning/udvælgelse til lige præcis det aktuelle formål. Ved samtlige materialer starter forståelsen af egenskaberne med erkendelse af strukturen på det atomare plan. For at etablere sammenhængen i praksis, skal egenskaberne også måles præcist.

Dette gælder selv for "low-tech" produkter såsom papirclips, hvor f.eks. elasticitet i metal-legeringen er en essentiel egenskab for at clipsen virker. Tilsvarende metal-egenskaber skal man studere (og studere længe) i de stål-legeringer, man bruger til at bygge f.eks. broer, jernbanespor eller højhuse af. Måling af egenskaber, og deres relation til struktur, breder sig videre til anvendeligheden af mursten og cement (hårdhed, brudstyrke), smykkesten (defekter, farver, transparens), feltstyrken i permanente magneter eller kapaciteten og genopladelighed af de batterier, der driver alt fra elbiler til tablets, bærbare computere eller mobiltelefoner.



▲ Grundstof-indhold er en essentiel puslespilsbrik i forståelsen af materiale-egenskaber. En af måderne, det kan måles på, er med *induceret koblet plasma-spektroskopi*. Her opløser man en lille smule af prøven i en passende syre eller opløsningsmiddel, der derefter fordampes ud i et plasma af gassen argon, som er ca. 8.000°C varmt. Ved disse temperaturer udsender alle grundstofferne lys med karakteristiske bølgelængder, som spektrometeret adskiller og analyserer. Intensiteterne fortæller, hvor meget af hvert grundstof, der er i prøven. Dette er den avancerede, kvantitative og automatiserede version af almindelig flamme-spektroskopi – tænk f.eks. på den gule flammefarve, der er karakteristisk for natrium, eller den grønne flammefarve, der er karakteristisk for kobber.



Plasma-flammen i et plasma-spektrometer. Resten af instrumentet sidder ude til venstre, hvor en linse fokuserer lyset fra den varmeste del af plasmaet ind i et optisk gitter, som spreder lyset i de enkelte bølgelængder. Spektral-linjerne fanges og måles af 32 lineære CCD-detektorer, samme teknologi, der sidder i kameraet i din Smartphone.



Tallet afslører bl.a., om partiklerne klumper sammen, eller om porerne i porøse materialer er tilstoppede. Dette er nyttig viden f.eks. for materialer, der skal kunne opsuge gas eller fange forurening. Et eksempel findes i vaskepulvere; de er fulde af pulveriserede, porøse materialer kaldet zeolitter, der er ionbyttere, som fjerner "hårde" ioner fra vaskevandet. Vandet bliver herved "blødt", og man undgår forsæbnings-reaktioner med vaskepulverets sæbe.

Andre gange analyserer man hvordan materialers vægt ændrer sig ved opvarmning – hvordan det nedbrydes, omdannes, frigiver stoffer eller slet og ret brænder af. Metoden kaldes *termogravimetrisk analyse* – TGA. Den er f.eks. vigtig under studier af materialer til hydrogen-opbevaring, idet man her skal kunne måle, hvor meget varme, der skal til for at drive hydrogen ud af stoffet. TGA ledsages ofte af *differential-termisk analyse* (DTA).

Her kigger man på, om der findes overgange og processer, der aktiveres af opvarmningen, som udvikler eller optager varme (exoterme hhv. endoterme reaktioner). Det kan f.eks. afsløre strukturelle ændringer i materialet, fordi omlægning af atomer – så de danner en ny struktur – tit enten forbruger eller afgiver energi.

Netop overgange mellem strukturer, eller materialer hvor man har flere rivaliserende strukturer i spil på samme tid, kan være svære at holde styr på. Krystallografi røber deres tilstedeværelse, men det kan være svært at danne et helhedsbillede på dens grundlag alene. Her melder der sig heldigvis endnu en ekstremt nyttig analyseteknik: *Elektron-mikroskopi*. Elektronmikroskoper kan forstørre flere millioner gange. De har dermed evnen til at "zoome ind" på et materiale i *alle størrelsesordener* – og afsløre dets opbygning, uanset om man måler i millimeter, mikrometer og nanometer. I de mest ekstreme forstørrelser kan man endda



Fysisk karakterisering hører også hjemme i et kemilaboratorium. Med instrumentet her undersøger man *Seebeck-koefficienten*, der indgår i evalueringen af termoelektriske materials ydeevne – dvs. hvor meget strøm man reelt kan høste ud af spildvarme hen over en given temperaturforskelle.

Elektriske og elektrokemiske egenskaber er ofte i centrum, bl.a. ved udvikling af materialer til genopladelige ion-batterier, såsom de Li-ion batterier der leverer strøm til stort set al transportabel elektronik. I baggrunden ses her et kombineret potentiostat/galvanostat spektrometer, som bruges til at måle strøm- og spændingskurver under op- og afladning, specifik elektrisk kapacitet samt elektrisk modstand ved forskellige (veksel)strømfrekvenser – såkaldt *impedans-spektroskopi*.



skimte selve krystalgitterne, helt nede i atomernes verden. Denne slags billeder er virkelig nyttige som supplement til de mange afsløringer, der kommer enten via krystallografi eller de andre målemetoder, der er skitseret ovenfor. Det er billeder, hvor man med det blotte øje kan skelne imellem krystallinske og uordnede domæner. Elektronmikroskoper kan tilmed producere 2D "kort", der viser fordelingen af grundstoffer i materialet, bestemme nanostrukturer i 3D *inden* materialet – og meget mere.

Strukturmålinger fra krystallografi og elektronmikroskopi kan ydermere kombineres med målinger fra *faststof-NMR*, der er baseret på samme teknologi som de MR-scannerne, vi kender fra hospitaler. *Faststof-NMR* kortlægger også struktur og er særligt velegnet til at se på meget "lokale" strukturfænomener, der ikke er gennemgående for materialet (= ikke har langtrækkende orden), og derfor ikke kan beskrives ved en enhedscelle. Teknik-

kerne supplerer således hinanden rigtigt godt og giver mulighed for yderligere at øge den viden, man får om materialernes opbygning.

For en materialekemiker er den største udfordring at finde og udvælge de rette teknikker, der er aktuelle for det forhåndenværende forskningsprojekt. Dette kræver en bred viden og megen øvelse. Heldigvis er universitets-uddannelsen netop tilrettelagt således, at man tilegner sig begge dele.

På de næste sider vil vi give et lille indblik i noget af den materialeforskning, som åbnes op netop gennem en sådan uddannelse. Udgangspunktet er her materialekemi på Aarhus Universitet.



Måling af egenskaber kan også kobles direkte til måling af krystalstruktur. Her er potentiostat/galvanostat/impedans-spektrometeret, der er vist ovenfor, tilsluttet en særlig batteri-testcelle, som kan monteres indeni et pulver-diffraktometer. Dermed kan strukturforandringer observeres, samtidig med at man op- og aflader materialerne inden i batteriet. Det er en elegant metode til at udforske hvornår, hvordan, hvorfor og hvor hurtigt et ion-batteri mister sin genopladelighed.



Nogle gange kan ét instrument konstrueres til at måle adskillige egenskaber samtidigt. Universitetets helium-kølede PPMS ("Physical Property Measurement System"), der ses her i forgrunden, måler til eksempel både

- Elektrisk ledningsevne
- Varme-ledningsevne
- Seebeck-koefficient
- Magnetisk susceptibilitet
- Den magnetiske hysteresse
- Hall-effekt
- Varmekapacitet.

Prøven (materialet) monteres på enden af den lange sonde, der på billedet er ved at blive sænket ned i målekammeret.

MATERIALEFORSKNING PÅ AARHUS UNIVERSITET

Herunder og på de følgende sider gives eksempler på forskellige materialetyper med udgangspunkt i forskningen på Aarhus Universitet. Figurteksterne fortæller om de syntesemetoder, man typisk bruger til at fremstille materialerne med.



Foto: Jesper Raas

TERMO-ELEKTRISKE MATERIALER

Termo-elektriske materialer har evnen til at "veksle" en temperaturforskel direkte til en elektrisk spændingsforskel. Et termoelektrisk modul kan derfor f.eks. omsætte spildvarme direkte til elektrisk strøm. Princippet betegnes med den engelske term "energy harvesting" – anvendelig energi udvundet af nytteløs spildenergi. "Termoelektriske generatorer" har udsigt til at indgå som komponent i den vedvarende energiforsyning, vi arbejder på at opbygge til vores fremtidige samfund.

Man kan også gå den modsatte vej. Hvis man sætter en elektrisk spænding henover et termoelektrisk materiale, bliver det varmt på den ene side og koldt på den anden. Dette udnyttes i såkaldte Peltier-elementer, som indeholder mange små, termoelektriske moduler, der kører parallelt. Det er Peltier-elementer, der sidder i miniature-camping-køleskabe eller i støjfri computer-kølesystemer. Man arbejder ihærdigt på at forbedre termoelektriske materialer så meget, at de f.eks. kan danne grundlag for en ny generation køleskabe – lydløse og vedligeholdelsesfrie – eller til direkte CPU-køling i computere, så processorerne kan arbejde endnu hurtigere uden at brænde sammen.

Nanopartikler af katalysatormaterialet ZrO_2 , der er komprimeret til små tabletter så de bliver nemmere at håndtere i industrielle sammenhænge. ZrO_2 bruges især ved syre-katalyserede reaktioner. Sammen med grundstoffet cerium (i materialefamilien $Ce_xZr_{1-x}O_2$) bruges det også i bilkatalysatorer til at fjerne skadelige gasser fra udstødningen.



Foto: H.V. Lukacs



Termoelektriske materialer fremstilles normalt ved termokemisk syntese, eller i sjældnere tilfælde med solvotermal syntese eller mikrobølge syntese. De fleste termoelektriske materialer er metalforbindelser, f.eks. Bi_2Te_3 , $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$, Zn_4Sb_3 , $FeSb_2$, $Mg_2Sn_xSi_{1-x}$, $RuSb_2$ eller $PbTe$.

NANOPARTIKLER

Nanopartikler er definitionsmessigt mindre end 100 nm (nm = nanometer = 10^{-9} meter) i alle tre dimensioner. Nanopartikler er bl.a. enormt effektive som katalysatorer – dvs. stoffer, der aktiverer og accelererer kemiske reaktioner. Kernen i den katalytiske effekt er, at de kemiske reaktioner kan forløbe meget lettere på selve overfladen af partiklerne, end de kunne et vilkårligt sted ude i det omgivende reaktionsmiljø. Og fordi nanopartikler er så små som de er, udgøres de nærmest af "ren overflade" – blot nogle få gram kan tilsammen have samme overfladeareal som en fodboldbane.

"Nano-katalyse" er vigtigt bl.a. i brændselsceller, samt for hele den kemiske teknologi, der giver vores samfund alt lige fra benzin og brændstoffer til kunstgødning, kemiske reagenser, plastik, lægemidler og tusindvis af andre produkter. Tilsvarende bruges nanopartikler i katalysatorerne i biler, hvor de nedbryder forurening i udstødningen. Ny forskning forsøger også at bruge nanopartikler til spildevandsrensning. Her er der tale om fotokatalytiske partikler, dvs. den katalytiske virkning opstår, når der falder lys – specifikt UV-lys – ind på partiklerne, og den forsvinder igen, når lyset slukkes. Dette er meget bekvemt, når man vil styre processen.



Pladeformede nanopartikler af batteri-materialet $LiCoO_2$. Tykkelsen af partiklerne er 10-20 nm, mens tværsnittet er 70-120 nm; de allerstørste bør derfor mere korrekt betegnes som et nanomateriale - ikke partikler. Billedet er taget med et transmissions-elektronmikroskop.

Nanopartikler kan fremstilles ved findeling af større partikler, typisk ved hjælp af en kuglemølle. Det er dog mere almindeligt at fremstille dem via kemisk syntese. Det kan gøres med f.eks. vådkemiske fældnings-reaktioner eller ved solvotermal syntese, evt. i form af flow-syntese, hvor nanopartiklerne syntetiseres "på samleband". Institut for Kemi forsker bl.a. i nanopartikler af metaller (Pt, Cu, Ag, Ni, Ru), inter-metaller og legeringer (Pt_xRu_{1-x} , PtPb, Bi_2Te_3) og oxider (TiO_2 , CeO_2 , ZrO_2 , SnO_2 , VO_2). Anvendelserne omfatter især katalysatorer, men også elektrisk ledende printerblæk, ion-batterier og termoelektriske generatoreer.

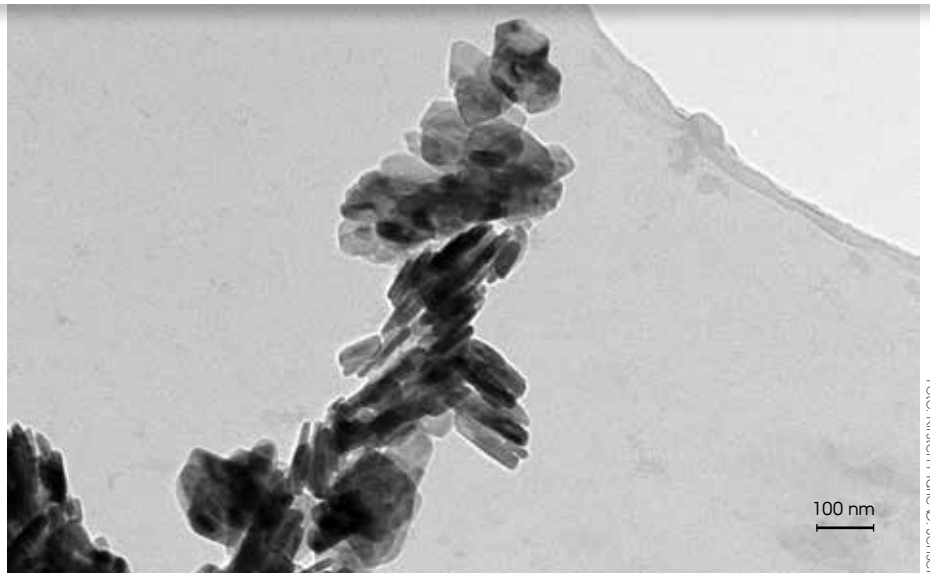


Foto: Kirsten Marie Ø. Jensen



▶ Magnetiske materialer syntetiseres oftest ved termokemisk syntese, solvothermal syntese eller forbrændingssyntese. På Aarhus Universitet er forskningen bl.a. rettet imod materialerne magnetit (Fe_3O_4), maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) og strontium-hexaferrit ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$).

MAGNETER

Magnetisme, eller magnetisk moment som det også kaldes, udspringer fundamentalt fra de elektroner i en materialestruktur, der ikke indgår i et elektronpar. Elektroner har et "spin" – en kvantemekanisk egenskab. I elektronpar peger de to partiklers spin hver sin vej – op og ned – og opvejer derfor hinanden. Det sker ikke for uparrede elektroner, da de ikke har nogen makker. For hver eneste enhedscelle forstærkes effekten hele vejen igennem materialet.

Dette er fundamentet for anvendelsen af alle permanente magneter. Den totale feltstyrke, man opnår, dikterer f.eks. effektiviteten af alle elmotorer. Her skal du tænke på alt fra elpiskere og power-tools til printere, dørene i supermarkedet, kompressorerne, der driver køleskabe og fryser, elektriske lokomotiver eller pumperne i grundvandsforsyningen. Samme magneter er også hjertet i omdannelsen af fysisk bevægelse (kinetisk energi) til elektricitet. Mere effektive magneter vil derfor give os mere effektive kraftværker, vindturbiner, osv.

De stærkeste magneter vi har i dag er baseret på grundstoffet neodymium, hvor hvert atom har 3 uparrede elektroner. I de rette materialer giver dette et meget stort magnetisk moment. Desværre er neodymium relativt sjældent, dyrt at udvinde og findes kun i undergrunden ganske få steder i verden. Meget forskning er derfor rettet mod at udvikle nye og bæredygtige magnetiske materialer, der også kan blive til stærke magneter, men som er baseret på simple, billigere og mere ressourceøkonomiske grundstoffer – f.eks. jern.





Metal-komplekser i opløsning får deres farver fra det kemiske samspil mellem metal-atomerne og ligander. Nogle gange kan en ligand være opløsningsmidlet selv. F.eks. er vandige opløsninger af ionforbindelsen kobbersulfat (CuSO_4) lyseblå pga. kemisk interaktion mellem kobber og vandmolekylerne i forholdet 1:6. Komplekset noteres $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ – bemærk, at det overordnet er en divalent ion. Tilsætter man nu ammoniakvand, erstattes fire H_2O med NH_3 , hvilket danner det flotte, mørkeblå kobber-tetra-amin kompleks $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$. Prøv selv i laboratoriet.



Foto: Søren Kjeldgaard

METAL-KOMPLEKSER

Navnet "kompleks" hentyder til en kemisk bindingsform: Kompleksbindingen. Dette er en rent historisk betegnelse; kompleksbindinger har elementer af både ionbinding og elektronpar-binding. Et kompleks består af et enkelt metal-atom, som knytter et antal atomer eller småmolekyler omkring sig, koordineret i et ordnet mønster. Metal-atomet i midten kaldes *metalcenteret*, og molekylerne omkring kaldes for *ligander*. Metalkomplekser kan findes i opløsning, eller de kan udfældes som faste materialer. Typiske metalcentre inkluderer kobber, chrom, kobolt, vanadium eller jern. Ligander kan være enkeltatomer, f.eks. klorid (Cl^-), eller småmolekyler såsom vand (H_2O), nitrogenoxid (NO), kulmonoxid (CO), oxygen (O_2) eller ammoniak (NH_3) og mange andre. Et velkendt eksempel på et metalkompleks finder vi i blodet i vores egen krop, specifikt blodets hæmoglobin. Det er stoffet, der er ansvarligt for blodets evne til at transportere ilt rundt i kroppen. Ilt-transporten sker ved kompleksbinding af O_2 (som ligand) til et jern-atom, der sidder i hjertet af hæmoglobin-proteinet. Det er også dette kompleksbundne jern-atom, der giver blodet dets stærke, røde farve.

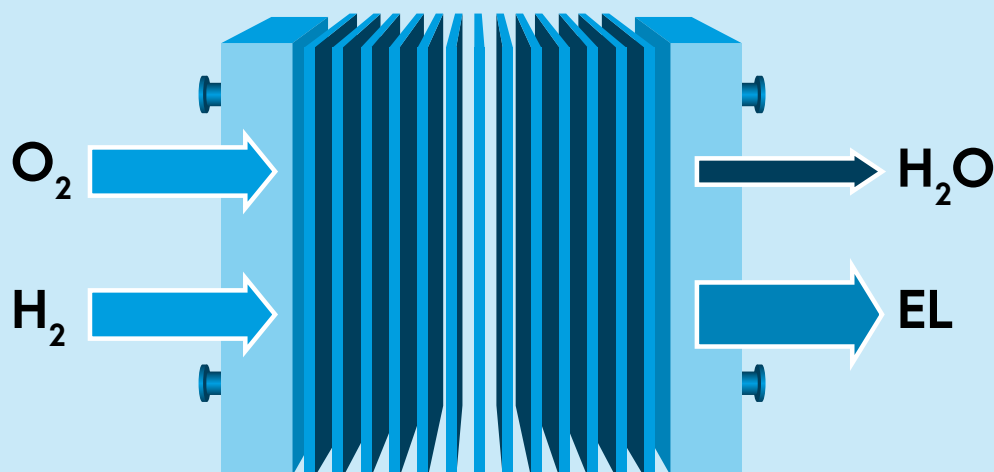
Metalkomplekser, hvad enten de er i opløsning eller findes som faste materialer, har tit utroligt smukke og stærke farver. Derfor kan de også bl.a. bruges i simple kemiske tests og til påvisning af metalatomer – herunder f.eks. skadelige tungmetaller – som afsløres af farveskiftene.



Faste metalkomplekser fremstilles normalt med almindelige fældningsreaktioner, der som regel udføres over adskillige dage, så man får pæne, velordnede krystaller ud af det. Materialet her er et metanoat-kompleks, dvs. liganden er baseformen af metansyre. Metanoat-komplekser undersøges bl.a. for deres magnetiske egenskaber.



Foto: Espen Eikeland



IONLEDERE (OG BRÆNDELSCELLER)

Vi er vant til at tænke på, at elektricitet ledes af elektroner. Sådan er hele vores samfunds elforsyning skruet sammen. Men det er ikke altid rigtigt. Elektricitet kan også bæres af ioner, fordi ioner har en elektrisk ladning. Den eneste forudsætning er, at ionerne er så løst bundne, at de kan "vandre" igennem strukturen af det materiale, de er en del af.

Sådanne ionledende materialer er bl.a. kernen i højtemperatur-brændselsceller, der kan omdanne kemisk energi direkte til strøm. Det sker via forbrændingsreaktioner, der jo ellers normalt bare udvikler varme. Princippet er en opdeling af den kemiske reaktion i to halv-reaktioner, der holdes fysisk adskilt af en faststof-membran. Det er membranen, der er lavet af ionledende materiale. På den ene side tilføres ilt (oxygen), som omdannes til oxid-ioner på membranoverfladen (O^{2-}). Hvert oxygen-atom modtager altså 2 elektroner ved ionisering. De dannede oxid-ioner vandrer herefter afsted igennem strukturen og om til den anden side af membranen, hvor resten af forbrændingsreaktionen finder sted. I denne proces afgiver de atter de 2 elektroner.

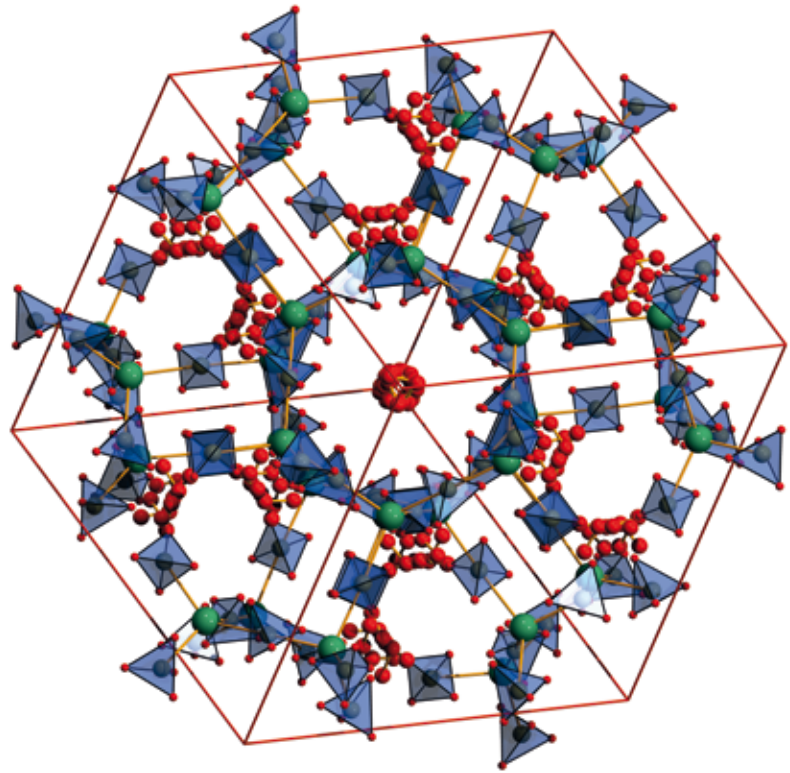
Overordnet er der altså flyttet elektroner igennem ionlederen, der "rider på ryggen" af mobile oxygen-atomer. Elektronerne kan ikke komme tilbage gennem membranen, fordi ionleder-materialet er keramisk og ikke leder strøm i almindelig forstand. Ion-ledningen foregår kun i én retning. Men elektronerne kan tilbageføres til deres udgangspunkt gennem et eksternt, elektrisk kredsløb. Dette er en elektrisk strøm. Den løber, så længe den kemiske reaktion i brændselscellen kører. Brændslet, der nærer forbrændingsreaktionen, kan være alt fra benzin, diesel eller alkoholer til hydrogen.

Der findes også ion-ledere, som leder andre ioner end O^{2-} - f.eks. Na^+ , F^- , H^+ eller Ag^+ . Disse ion-ledere bruges ikke i brændselsceller, men har i stedet en række andre mulige anvendelser.

Uorganiske ionledere kan bl.a. fremstilles (indledningsvist) ved fælningsreaktioner eller solvothermal syntese. På dette stadie er produktet partikler i en væske - en suspension. Partiklerne opsamles herefter ved hjælp af filtrering eller centrifugering. De tørres, hvorefter pulveret fyldes i forme, der opvarmes mens de komprimeres under stemplet i en højtrykspresse. Herved får man dannet en massiv og kompakt skive af materialet. Dette er membranen, der siden hen indbygges i brændselscellen. Eksempler på ionleder-materialer er $(Y,Sc)_xZr_{1-x}O_2$, $\beta-Al_2O_3$, LaF_3 og $\alpha-AgI$.



Materialer til hydrogenopbevaring fremstilles enten ved mekano-kemisk syntese eller via vådkemisk syntese i beskyttet atmosfære. På Institut for Kemi retter forskningen sig bl.a. imod materialerne MgH_2 , $\text{Ca}(\text{BH}_4)_2$, $\text{Mn}(\text{BH}_4)_2$ og NaGaH_4 . Eksemplet der vises her er magnesium-borhydrid, $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2$, som er unikt, fordi det kan binde hydrogen både kemisk og fysisk. Den fysiske binding fungerer via tilbageholdelse af H_2 -molekyler i ultrasmå kanaler, der gennemtrænger hele materialet. Samspillet mellem de to mekanismer gør $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2$ til et meget lovende materiale til hydrogenopbevaring.



Figur: Bo Richter



Foto: Colourbox

HYDROGENOPBEVARING

Vi har rigelig tilgængelig, vedvarende energi. Det store problem er, at det nogle gange kan være vindstille i dagevis eller at solen ikke altid skinner. Derfor er det nødvendigt at finde en effektiv måde til at opbevare vedvarende energi, og gerne en metode der kan bruges i biler i stedet for benzin. Hydrogen er det stof, der indeholder mest energi pr. masseenhed overhovedet, og det kan nemt fremstilles ved elektrolyse af vand. Opbevaring af hydrogen på en kompakt måde er derimod vanskelig. En af mulighederne findes imidlertid i en "familie" af faste materialer, der kaldes hydrider. Hydrider indeholder hydrogen-ioner med en negativ ladning (H^-). Dette er usædvanligt og markant forskelligt fra det normale oxidationstrin, der har en enkelt positiv ladning (H^+). Resultatet er bl.a., at hydrider er meget reaktive. Men gevinsten er, at tætheden af hydrogen kan være dobbelt så stor i hydrider som i ren, flydende hydrogen.

Hydrider kan bruges til både stationær og mobil energiopbevaring, f.eks. i gaffeltrucks, ubåde og indendørs køretøjer. Desuden kan de bruges til 'hydrogen batterier' og opbevaring af solvarme.



SOLCELLER

Solceller er en velkendt del af vores energiforsyning, og langt de fleste er baseret på uorganiske materialer. De kaldes også for fotovoltaiske materialer. Navnet afspejler den grundlæggende egenskab at omdanne lys direkte til strøm. Kommercielle solceller består i dag af ultrarent silicium. Det er ikke helt billigt at fremstille samt skære i de tynde skiver, der skal bruges i solcellemoduler. Det bliver derfor svært at gøre silicium-solceller billigere. Der er imidlertid ved at dukke alternative materialer op, som udforskes i disse år. Nogle er baseret på nanopartikler, f.eks. af materialet titandioxid (TiO_2) der bl.a. bruges i solcreme eller som pigment i maling. En anden mulighed er solceller baseret på metal-sulfider (svovlforbindelser), f.eks. $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$. Begge har den fordel, at de kan syntetiseres i store mængder med enklere metoder. De er imidlertid endnu ikke så effektive som silicium-solceller, så der ligger stadig nogle års forskningsindsats forude.

▲ Normale solceller er lavet af silicium, der fremstilles ud fra SiO_2 i en termokemisk proces. Silicium-metallet renses bagefter ved andre termokemiske processer, så det opnår meget høj renhed. Solceller af TiO_2 eller sulfider kan derimod fremstilles ved fældningsreaktioner eller solvotermaal syntese, evt. flow-syntese, hvilket vil gøre produktionen meget effektiv.



▲ Vi har alle prøvet at oplade et batteri, men de færreste tænker i hverdagen på, at opladningen af et lithium-ion batteri faktisk indebærer en diffusion (vandring) af Li^+ -ioner fra katoden (den positive ende) til anoden (den negative ende).

Det er let for en ion at bevæge sig i en væske, og derfor er de to elektroder inde i batteriet forbundet af en væske tilsat en række lithium-salte. Det er derimod sværere for ioner at bevæge sig i et fast stof, og derfor fokuserer meget forskning inden for syntese af batterimaterialer på at lave nanopartikler. I de meget små partikler vil den afstand, Li^+ -ionerne skal vandre i de faste stoffer (elektroderne), være meget mindre, og det vil betyde en bedre og hurtigere opladning. Især solvotermaal *flow*-syntese har tiltrukket meget opmærksomhed i forskningsverdenen, da man med denne metode kan masseproducere nanopartikler på en miljørigtig måde.

LITHIUM-BATTERIER

Lithium-ion batterier er strømkilden i vores bærbare computere, smartphones, tablets, GPS'er og et væld af tilsvarende transportabel elektronik. Deres evne til hurtig opladning og høj strømkapacitet har revolutioneret vores samfund siden starten af 1990'erne. Hele lithium-batteri teknologien hviler på uorganiske materialer, specifikt de to elektroder (katoden og anoden) der er indeni batterierne, og som er ansvarlige for hele deres funktion. Et par eksempler på katode-materialer er lithium-coboltoxid (LiCoO_2) og lithium-jernfosfat (LiFePO_4), imens anode materialer f.eks. omfatter lithium-titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) eller grafit. Fremtidens batterimaterialer retter sig imidlertid ikke kun mod transportabel elektronik. Man udvikler i øjeblikket typer af ion-batterier, der har egenskaber, som er tilpasset vores elforsyning. Med store, stationære batteristationer håber man at kunne lagre vedvarende energi, så solenergi f.eks. kan bruges om natten og vindkraft når det er vindstille.

CEMENT

Cement er et af de vigtigste materialer for hele vores civilisation. Det er grundlaget for beton, og bruges i stort set alle tænkelige bygningsværker, lige fra fabrikker og parcelhuse til broer, tunneller og skyskrabere. Der forskes konstant i at lave stærkere cement, så man skal bruge mindre af det og dermed lave stærkere (eller slankere) bygningskonstruktioner. Tilsvarende forskes der i mere miljøvenlig cement, hvor man bl.a. bruger affaldsprodukter fra andre industrier som fyldstof. Hermed håber man at kunne nedbringe CO_2 -udslippet fra cementindustrien, der bidrager væsentligt til verdens samlede udledning af drivhusgas. Hele cementproduktionen er baseret på råmaterialerne kridt og sand, som yderligere tilsættes forskellige lermineraller, askeprodukter eller affalds-papirmasse alt efter de egenskaber, den færdige cement skal have. Inden for forskningen består udfordringen i at analysere de enkelte råmaterialer kemisk og bruge resultaterne som grundlag for at designe nye typer cement. Man forsøger altså at gennemskue, præcist hvordan råmaterialerne spiller sammen for at danne cementens overordnede egenskaber. Designprocessen omfatter stillingtagen til kemisk sammensætning, forarbejdningsprocesser (f.eks. pulveriseringsteknik) og hvilke reaktionsbetingelser, der bruges til de kemiske reaktioner i produktionen. Herefter følger omfattende afprøvning og analyser, f.eks. fysisk/mekanisk styrke og resistens overfor fugt, varme, osv.



- ▲ Cement fremstilles i flere procestrin og ud fra forskellige råmaterialer, der varierer, alt efter hvilke egenskaber, cementen skal have. Den fælles ingrediens for alle typer cement er kridt (CaCO_3), der blandes med sand og bestemte andre ingredienser. Blandingen føres herefter ind i en roterende højtemperaturovn, hvor den opvarmes til mere end 1400°C . Temperaturen driver en række termokemiske reaktioner, blandt andet af CaCO_3 til CaO (calciumoxid). Reaktionsprodukterne er essentielle for den færdige cements egenskaber, inklusiv evnen til at størkne og hærde, når den til sidst bliver blandet med vand og støbt som beton eller muret ind i murværk.



UDDANNELSE

Uddannelsen til materialekemiker starter som en almindelig uddannelse i kemi.

De første 2 år bruger du til at opbygge grundlæggende færdigheder – etablere en "værktøjskasse". Det involverer også støt-tefagene fysik og matematik. Fysik for at du bedre kan forstå f.eks. elektriske kræfter i atomer og molekyler, elektromagnetisk stråling, og den kvantemekanik, der ligger bag kemi. Matematik binder det hele sammen og giver et "sprog" for formuleringen af de naturlove, som gælder inden for kemi, fysik og andre natur-fag. Dette er nødvendigt for senere hen at kunne arbejde med data og analyser; det er værd at erindre, at stort set alle måle-resultater udtrykkes i tal.

På 3. år begynder du at kunne vælge fag selv og får dermed mulighed for at specialisere dig. Det er også her, du første gang bliver inddraget i egentlig forskning. Det sker i forbindelse med dit bachelor-projekt.

I bachelor-projektet står du for første gang med ansvaret for at udforske noget nyt. Projekterne udføres alle over 6 måneder, der ligger i anden halvdel af 3. studieår. Når du har afleveret og bestået, står du med din første akademiske grad i hånden – bachelorgraden.

Projekterne udbydes af de fastansatte undervisere (profes-sorer, lektorer, etc.) på instituttet. Hver underviser har som regel mange forskellige projekter i spil, så der er rigeligt at vælge imel-lem. Det kan af samme årsag også være lidt uoverskueligt at navigere blandt mulighederne. Derfor afholdes der med jæv-ne mellemrum såkaldte "bachelor-arrangementer"; det er en slags uformelle udstillings-messer afholdt af alle underviserne sammen med ældre studerende, som præsenterer "markedet" af aktuelle bachelorprojekter. Her kan du som yngre studerende vandre rundt, slappe af med en kop kaffe, kigge på præsentati-onerne og sludre med underviserne og dine medstuderende om hvad som helst, du synes virker interessant.

Forhåbentlig finder du lige præcis det projekt, du synes er fan-tastisk spændende.

Den ansvarlige underviser, der udbyder bachelor-projektet, bli-ver herefter din vejleder. Den endelige tilrettelæggelse af pro-jektets indhold sker gennem en dialog mellem dig og ham/hende, så indholdet tilpasses jeres fælles ønsker.

I takt med at projektet går i gang, bliver du herfra medlem af forskningsgruppen omkring din nye vejleder. Dette markerer en skillevej for dig som studerende: Den begyndende overgang fra studerende til forsker. Via dit bachelorprojekts forskningsfelt har du netop her muligheden for at vælge den gren af kemien, du ønsker skal blive dit fremtidige ekspertområde. Det kan f.eks. være den uorganiske materialekemi.

Derefter fortsætter uddannelsen med kandidatstudiet. Det in-volverer mere avanceret forskning og afsluttes med et speciale. Måske får du undervejs lyst til at fortsætte med en ph.d.-uddan-nelse (forskeruddannelsen), hvilket dog kræver, at du har fået rimeligt gode karakterer i dine fag og har udvist engagement og selvstændighed i den forskning, du hidtil har haft ansvaret for.

Med dette sagt skal du HUSKE, at du grundlæggende ikke behøver at overskue mere end bachelor-uddannelsen til at be-gynde med. Resten vil afsløre sig selv ganske naturligt. Ingen for-venter, at du skal kunne overskue hele din uddannelse allerede fra Dag 1.

Det vigtigste er, at du fra start er klar over uddannelsens op-bygning, og især det faktum, at det i moderne videnskab des-værre ikke er muligt at arbejde med avanceret forskning, før du har en del grundlæggende færdigheder på plads. Du skal "lære for at kunne lære". De fleste af de fag, du skal igennem, vil du forhåbentlig synes er utroligt spændende – andre vil du måske finde kedelige. Det er svært at undgå. Men de evner som for-sker, du opnår undervejs, åbner virkelig mange muligheder og indebærer for mange samtidig en stor personlig tilfredsstillelse - udløst af bevidstheden om, at man virkelig arbejder med at udforske NYT. Det drivende engagement stammer med andre ord fra meget mere end blot udsigten til fremtidigt arbejde og en spændende karriere.





Foto: Jesper Røis

BACHELOR- PROJEKTER

EKSEMPLER FRA 2014

Fagudtryk er her bibeholdt for at give en præcis repræsentation af projekterne. Alle disse udtryk vil være velkendte for dig, når du når frem til 3. år.

ASKE M. JØRGENSEN

INVESTIGATION OF NOVEL TELLURIUM BASED THERMOELECTRICS

An-isotrope materialer udviser forskellige egenskaber i hvert af rummets tre dimensioner. Projektet her har handlet om termokemisk syntese (bl.a. flux- og smelte-syntese) af topotentielle anisotrope termoelektriske materialer, K_2SnTe_5 og $RuSbTe$. Produkterne blev efterbehandlet med spark-plasma sintringspresning og karakteriseret med pulverrøntgendiffraktion, elektronmikroskopi og måling af halvleder-egenskaber, bl.a. Hall-effekt og 2D-kortlægning af Seebeck-koefficienter.

KIRSTINE DALGAARD

DEVELOPMENT OF TiO_2 BRONZE AS AN ANODE MATERIAL FOR LITHIUM AND SODIUM ION BATTERIES

Det keramiske materiale TiO_2 er kandidat til et nyt anodemateriale til ion-batterier. Især den såkaldte bronze-fase (TiO_2 -B) synes lovende, da denne har en struktur, som er ideel til indlejring af ioner. Projektet her omhandlede TiO_2 -B fremstillet via hydrotermal syntese med termisk efterbehandling; det viste sig bl.a. at indebære en kamp imod forurening fra krystalfasen anatas- TiO_2 . Produkterne blev karakteriseret med røntgendiffraktion, elektronmikroskopi, IR-spektroskopi samt termo-gravimetrisk analyse, og materialerne blev desuden indbygget i test-batterier, så de elektrokemiske egenskaber kunne analyseres.



Foto: Jesper Røis

SANNA SOMMER

METAL BOROHYRIDES SYNTHESIZED FROM METAL BORIDES AND METAL HYDRIDES

Dette projekt omhandlede syntese af metal-borhydrider til opbevaring af hydrogen. Hertil benyttede man stofferne CaB_6 og AlB_2 , der er blandt de restprodukter, man kan få ved udtræk af hydrogen fra metal-borhydrider generelt. Metoden var mekano-kemisk syntese under et overtryk af hydrogen, både med og uden andre reaktanter. Produkterne blev karakteriseret med IR-spektroskopi, NMR, termo-gravimetrisk analyse, differential-scanning kalorimetri samt pulver-røntgendiffraction – bl.a. som "live-optagelse" under opvarmning og nedkøling.

MATHIAS JØRGENSEN

HIGH PURITY SYNTHESIS OF THE SOLID STATE LITHIUM ION CONDUCTOR $\text{LiCe}(\text{BH}_4)_3\text{Cl}$

Lithium-ion batterier er strømkilden til stort set al bærbar elektronik – tablets, mobiltelefoner, osv. Inden i batterierne findes en elektrolyt, der som regel er flydende, men som også kan være et fast stof. Én kandidat er faststof-ionlederen $\text{LiCe}(\text{BH}_4)_3\text{Cl}$, der i dette projekt blev fremstillet med vådkemisk og mekano-kemisk syntese i inert atmosfære. Produkterne blev bestemt med synkrotron-røntgendiffraction, termogravimetrisk massespektroskopi, IR-spektroskopi og elektrokemisk impedansspektroskopi. Undervejs i projektet opdagede man i øvrigt det hidtil ukendte materiale $\text{Ce}(\text{BH}_4)_3$.

METTE BORUP

KRYSTALLOGRAFISK HØJTRYKSSTUDIE AF ZINK-ANTIMONID SYSTEMET

"Zink-antimonid systemet" omfatter materialerne ZnSb samt $-\text{Zn}_4\text{Sb}_3$, der er kendte termoelektriske materialer (udviklet på Aarhus Universitet). Projektet har handlet om at undersøge de struktur-kemiske forandringer, der sker i materialerne, når de udsættes for høje tryk – mellem 20.000 og 100.000 atm.; herunder om de termoelektriske egenskaber forbedres under trykpåvirkning. Tryksætningen foregik med "diamant-ambolt celler": Små ultra-højtryksmoduler som kan monteres direkte på et en-krystal diffraktometer.

ANNA ZINK

HYDROTHERMAL SYNTese OG KARAKTERISERING AF MAGNETISKE $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ NANOPARTIKLER

Strontium hexaferrit, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, viser potentiale til at blive et af fremtidens magnetiske materialer i industrien. Dette projekt har handlet om syntese af $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ med to forskellige hydrotermale metoder under en række forskellige reaktionsbetingelser. Produkterne blev karakteriseret med pulverrøntgendiffraction, elektronmikroskopi samt ved måling af magnetiske egenskaber, f.eks. hysteresekurver, som bl.a. afslører, hvor stærkt et magnetfelt et materiale kan opretholde.



Foto: Lars Kruse

SRP-PROJEKTER

chem.au.dk/videnudveksling/studieretningsprojekter-srp

Hvis dit SRP-projekt inddrager kemi, har du mulighed for at udføre en del af det eksperimentelle arbejde i laboratorierne ved Institut for Kemi, Aarhus Universitet. Der findes et onlinekatalog med forskellige typer af projekter, instituttet understøtter. Det opdateres fra år til år. Projekterne spænder bredt over instituttets faglige kompetenceområder.

Nedenfor er et par eksempler på SRP-projekter, der knytter sig til uorganisk materialekemi.

RØNTGEN-KRYSTALLOGRAFISK UNDERSØGELSE AF UDVALGTE KRYSTALSTRUKTURER

– opgaver der undersøger strukturkemi på tværs af en "familie" af materialer, f.eks. sulfider (ZnS , NiS , FeS_2 , osv.), oxider (TiO_2 , Fe_2O_3 , CuO , osv.) eller halogenider (AgCl , AgBr , AgI), med forudgående vådkemisk syntese af udvalgte materialer hjemme på gymnasiet.

FASTSTOF-SYNTese AF EN HØJTEMPERATUR-SUPERLEDER

– en opgave, hvor man termokemisk syntetiserer det superledende materiale $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ og produktbestemmer med pulver-røntgendiffraction samt evt. iodometrisk titrering. Via koldpresning kan man efterfølgende fremstille en tablet af materialet og observere Meissner-effekten ("den svævende magnet") – hvis synteseproduktet er rent nok.



Foto: Søren Kjeldgaard

FYSISK/KEMISKE EGENSKABER FOR DIAMANTER HHV. DIAMANTLIGNENDE MATERIALER

– en opgave om naturlige hhv. syntetiske diamanter, deres fremstilling og andre diamant-lignende materialer (f.eks. ZrO_2), undersøgt i et struktur-kemisk perspektiv – herunder målinger på kommercielle pulvere af diamant og øvrige, udvalgte materialer.

METALLER I MØNTER

– opgaver centreret omkring krystalstrukturer og grundstofindhold i forskellige mønter på tværs af enten kulturer, tidsperioder eller inden for samme valuta; herunder f.eks. krystallografiske målinger af mønters metal-legeringer, overflade-grundstofanalyse med røntgen-spektroskopi eller dybde/total-grundstofanalyse med plasma-spektroskopi.

TEORETISK OG EKSPERIMENTEL BELYSNING AF UDVALGTE METAL-OXALAT KOMPLEKSER

– en opgave i kompleks-kemi, herunder fremstilling (på gymnasiet) af en række metal-oxalat komplekser med efterfølgende krystallografisk identifikation af produkterne på universitetet; muligt perspektiv til f.eks. nyresten eller urinvejssten (hovedsageligt calcium-oxalat) samt tilsætningsstoffet "non-oxal", som man bruger i madlavning.

SYNTESE AF ET TERMoeLEKTRISK MATERIALE OG SAMLING AF ET TERMoeLEKTRISK MODUL

– en opgave bestående i syntese af det termoelektriske materiale Bi_2Te_3 , efterbehandling med spark-plasma sintrings-presning og videre konstruktion af en fungerende termo-generator, som evt. efterfølgende kan sammenlignes med et kommercielt eksemplar.

SYNTESE AF MAGNETISK $SrFe_{12}O_{19}$ OG MÅLING AF MAGNETISKE EGENSKABER

– en opgave der benytter en vådkemisk spiral-reaktor til syntese af $SrFe_{12}O_{19}$, der er et af de mest brugte magnetiske materialer i dag; de magnetiske egenskaber (hysteresekurver) bestemmes kvalitativt, og produkterne karakteriseres med pulver-røntgendiffraktion. Slutteligt kan der sammenlignes med en kommerciel magnet.

KRYSTALSTRUKTURER OG GRUNDSTOFFER I CEMENTMATERIALER

– opgaver centreret omkring cement og mørtel, der har været byggematerialer i tusindvis af år. Herunder f.eks. krystallografiske undersøgelser af cements råmaterialer vs. det færdige produkt, og/eller grundstof-analyse af cement ved hjælp af plasma- eller røntgen-spektroskopi; muligt perspektiv til udvaskning af grundstoffer (f.eks. i syreregn).

ERHVERVSLIV

Materialekemikere ansættes mange steder, både inden for universitetsverdenen og ude i industrien. Den bredere forskning foregår oftest på universiteterne – ikke overraskende, da alt det analyseudstyr, der skal bruges, hurtigt bliver utroligt dyrt for en virksomhed. Ude i industrien er forskningen skarpt målrettet mod konkrete anvendelser. Det kan f.eks. være katalysatorforskning, batterier, brændselsceller, solceller, vindmøller, kemikalieproduktion etc. Forskningen kan også have procesmæssig karakter, f.eks. i produktionsvirksomheder, hvor selve fremstillingen af et eksisterende produkt skal forbedres.

Universiteterne har omfattende samarbejder med dansk industri. En af de seneste succeshistorier for materialeforskningen fra Aarhus Universitet finder man f.eks. inden for udvikling af termoelektriske materialer. Her har Danmark p.t. udsigt til en førerposition i termoelektrisk elproduktion, baseret på patenter udviklet i universitetets laboratorier. Generelt er energitemaer ret fremherskende for universitetets forskning i materialekemi. Sammen med Teknologisk Institut er man bl.a. i gang med at udvikle nye katalysatorer til en forbedret brændselscelleteknologi. Forskningen er bl.a. ved munde ud i fremstilling af verdens mindste metanol-brændselscelle – så lille at den vil kunne erstatte batterier i meget små apparater (f.eks. høreapparater). Inden for katalysatorforskning studerer man desuden en katalytisk omsætning af biomasse til bio-råolie med henblik på at skaffe vores samfund bæredygtige olie i fremtiden. Der er her skarp fokus på overskud-biomasser (affald), så man ikke forbruger værdifulde ressourcer i olieproduktionen. Aarhus Universitet

samarbejder også med den danske cement-industri om måder at forbedre kvaliteten og bæredygtigheden i cementproduktion, så man får bedre og stærkere konstruktionsmaterialer, der giver mindre CO₂-udledning til atmosfæren.

Erhvervsforskningen breder sig videre ud i EU, hvor Aarhus Universitet f.eks. er med til at udvikle nye, bæredygtige magnetiske materialer, der ikke kræver sjældne og dyre grundstoffer. Man har også studeret brugen af uorganiske (keramiske) materialer som miljøvenlige komponenter i nye, forbedrede rustbeskyttelses-malinger til stålkonstruktioner. Eksemplerne er mange.

Som materialekemiker har du gode muligheder for ansættelse i erhvervslivet. Arbejdsløsheden er meget lav. Ligeledes er der gode muligheder for ansættelser i grænselaget mellem universitetsforskning og industri, hvis man gerne vil beholde et ben i begge lejre. Det foregår via såkaldte "erhvervs-ph.d." eller "erhvervs-postdoc" stipendier, der etableres gennem samarbejder mellem universitet og virksomhed.

Uanset ansættelsesformen opnår flertallet af materialekemikere en rigtig positiv udnyttelse af deres uddannelser. Nogle kan bruge deres specifikke ekspertise på daglig basis, hvor det for andre naturligvis er mere sjældent eller indirekte. Men samtlige adspurgte har oplevet deres materialekemiske viden som et meget direkte og konstruktivt "springbræt" for erhvervsdelen af nye færdigheder til jobbet. Allerede her går døren derfor op for en lovende, videre karriere.



PERSONER BAG UDDANNELSEN

JAKOB AHLBURG

Uddannelse: Ba. Scient. Nanoscience

Under uddannelse i Uorganisk Kemi/Materialekemi

Jeg hedder Jakob og er 27 år. Jeg færdiggjorde i sommeren 2013 min bachelor i nanoscience med fagretning i uorganisk materialekemi, hvor jeg skrev min bacheloropgave om syntese af magnetiske nanopartikler. Jeg har nu valgt at bruge et år på at undersøge mulighederne inden for undervisning, ved at tage et år imellem bachelor- og kandidatuddannelsen, hvor jeg er gymnasielærer på Favrskov gymnasium i Hadsten.

Jeg har altid interesseret mig meget for at formidle viden til andre, men er i tvivl om, hvorvidt jeg ville kunne arbejde som underviser et helt liv. Derfor er det – når man uddannes i naturvidenskab – et stort privilegium, at mange gymnasier mangler naturvidenskabelige lærere. Man kan derfor komme ud og prøve kræfter med jobbet som årsvikar.

Når jeg har skrevet mit speciale, samt evt. været igennem videreuddannelsen til ph.d. bagefter, vil jeg dog nok først søge ud som forsker. På denne måde har jeg stadig muligheden for at blive underviser senere i mit liv, hvilket jeg helt sikkert ikke vil kunne undvære.

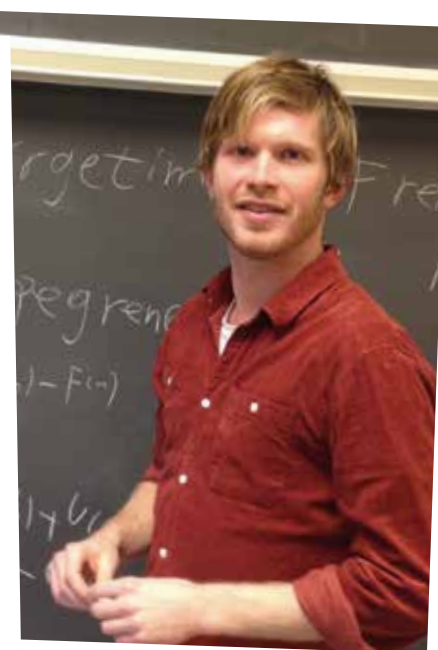


Foto: Jakob Ahlburg



BIRGITTE LODBERG PEDERSEN

Uddannelse: Cand Scient. Geologi,

Ph. D. i Uorganisk Kemi/Materialekemi.

Siden jeg afsluttede min uddannelse på universitetet har jeg været ansat hos FL Smidth A/S, på deres forsknings- og udviklingscenter i Mariager. Det er et spændende og meget udfordrende job. Jeg har blandt andet haft ansvaret for deres røntgenlaboratorium – og alle de analyser, det udfører.

Hoveddelen af F.L. Smidths forretning består i at bygge eller forbedre cementfabrikker over hele verden. For at kunne bygge og dimensionere rigtigt er det nødvendigt med tilbundsående undersøgelser af de råmaterialer, som skal anvendes. Da cement består af krystallinske materialer, er krystallografi (og dermed røntgen-diffraktion) et meget vigtigt værktøj. Laboratorieresultaterne skal i sidste ende bruges til at dimensionere en fabrik, der producerer 2-4.000 tons cement pr dag. Så der ligger et virkeligt stort ansvar i jobbet, hvilket er utroligt tilfredsstillende for mig.

Foto: Niels Jørgen Hansen

BO RICHTER

Uddannelse: Cand. scient. Kemi
Kandidatgrad i Organisk/Metal-organisk Kemi

Som forskningstekniker ved universitetet er hverdagen travl, men heldigvis fyldt med mange forskellige interessante og udfordrende opgaver. Paletten spænder vidt; fra undervisning, daglig drift, over administrative opgaver til grundforskning.

Undervisning er en stor del af jobbet, eftersom universitetet jo er en uddannelsesinstitution. I den forbindelse er jeg involveret i at planlægge og tilrettelægge laboratorieundervisning, så de studerende kan gennemgå praktiske forløb og lære for alvor at bruge et laboratorium og håndtere avancerede instrumenter. Andre daglige opgaver indebærer bl.a. vedligehold af forskelligt videnskabeligt udstyr – i mit tilfælde f.eks. handskebokse, som er arbejdskamre fyldt med en ureaktiv gas, beregnet til håndtering af materialer, der er følsomme over for ilt eller luftens fugt. Generelt er det en del af jobbet at holde opsyn med forskningslaboratorier, hvor jeg hjælper med til at opretholde et effektivt og behageligt arbejdsmiljø.

Forskningen, jeg er involveret i, går ud på at undersøge energibærende materialer til opbevaring af hydrogen. Oftest fremstilles og undersøges disse stoffer af gruppen selv i de laboratorier, jeg er tilknyttet. Arbejdet som forskningstekniker er således meget alsidigt. Opgaverne er mange, og det er nok blandt de vigtigste grunde til at det (i mine øjne) er et virkelig privilegeret job.



Foto: Jesper Røis



Foto: Haldor Topsøe

CHRISTOFFER TYRSTED

Uddannelse: Cand. scient. Nanoscience
Ph.D. i Uorganisk Kemi/Materialekemi

Jeg startede på Nanoscience linjen ved iNANO, Aarhus Universitet i 2005. Under min studietid fangede materialevidenskab hurtigt min interesse, og jeg valgte derfor at målrette mit studium imod Kemi. Her tog jeg min PhD-uddannelse hos Professor Bo Brummerstedt Iversen, som er en af de førende forskere inden for materialekemi i Danmark. Min forskning omhandlede primært materialesyntese samt bestemmelse af atomar struktur med røntgendiffraktion.

Jeg blev i 2013 færdig med min ph.d.-uddannelse og blev straks ansat som Research Scientist ved Haldor Topsøe A/S i Kgs. Lyngby. Haldor Topsøe er et af de ledende firmaer inden for kemisk katalyse i verden og har en stærk tradition for forskning og udvikling af nye katalysatormaterialer. For at kunne forbedre den katalytiske effekt er det essentielt at forstå sammenhængen mellem atomar struktur og egenskaber. Røntgendiffraktion er dermed også her et uundværligt værktøj til at afdække strukturen af de mange nye materialer, der dagligt bliver testet for katalytisk anvendelse. Jeg er ansat til at forbedre de røntgen-teknikker, man bruger i analysen af de fremstillede katalysatorer. I mit job bruger jeg derfor dagligt de kompetencer, jeg opnåede under min PhD, både inden for materialekemi, projektplanlægning og problemknusning.

PERSONER BAG UDDANNELSEN

Foto: Teknologisk Institut

**PETER BØGH PEDERSEN****Uddannelse:** Cand. scient. Kemi

Kandidatgrad i Uorganisk Kemi/Materialekemi

Efter min uddannelse i materialekemi blev jeg ansat ved FLSmidth, som bygger cementfabrikker og mineraludvindingsfabrikker over hele verden. Jeg kom til at arbejde i deres udviklingslaboratorium, hvor jeg fik ansvar for halvdelen af alle deres fysiske testmetoder – og skulle samtidig være bindeled til de kemiske analysemetoder. Det var et rigtig spændende job, hvor jeg selv skulle udvikle nye metoder til test af cement- og mineralprodukter samt optimere på andre, eksisterende metoder. Parallelt hermed fik jeg mulighed for at afprøve mine kvalifikationer som projektleder, da jeg også skulle styre opgaver og mindre projekter bl.a. i Indien og USA.

Efter et par år på FLSmidth valgte jeg at skifte job og arbejder nu i stedet på Teknologisk Institut i Aarhus ved Center for Kemi- og Bioteknologi. Det er et fantastisk job, hvor jeg virkelig får brugt min faglighed og mine projektlederevner. Jeg arbejder med opgaver, hvor jeg skal løse kemiske problemstillinger for virksomheder ude i industrien, samtidig med at jeg selv har ansvar for at søge, komme på løsninger, og styre store projekter. Det er afvekslende, da næsten ingen af de opgaver, jeg har, ligner hinanden. Det stiller store krav til min viden og mine kompetencer til at indhente ny viden og indgå i samarbejder.

HAO YIN

Uddannelse: Cand. scient. Kemi
Ph.D. i Uorganisk Kemi/Materialekemi

Studiet i materialekemi har ikke kun givet mig et superspændende job inden for en nystartet virksomhed, det giver mig også dagligt fornøjelsen af at udforske det ukendte. TEGnology ApS bruger (og udvikler) avanceret materialeteknologi til fremstilling af termo-elektriske generatorer, dvs. moduler som direkte kan lave spildvarme om til strøm. Det var lige netop mit kerneområde under min ph.d.-uddannelse. Den startede i Kina de første 3 år, hvorefter jeg flyttede til Danmark og fuldendte studiet ved Aarhus Universitet. Her blev jeg undervejs involveret i forskningssamarbejdet med TEGnology. I kraft af mit arbejde håber jeg nu også på at opnå statsborgerskab her i landet.

Gennem den forskning, der følger med jobbet, er det min intention at hjælpe lidt med til at løse nogle af verdens voksende energiproblemer. Det er enormt tilfredsstillende for mig at kunne udnytte min uddannelse som materialekemiker på noget, der er så betydningsfuldt.

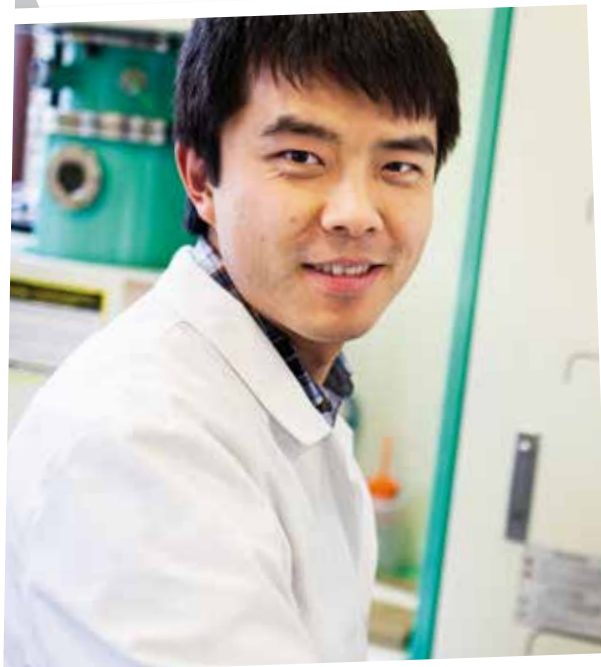


Foto: Jesper Raas

HELLE SVENDSEN

Uddannelse: Cand. scient. Kemi
Ph.D. i Uorganisk Kemi/Materialekemi

Jeg blev færdig med min ph.d. uddannelse i materialekemi på Aarhus Universitet i 2010. Uddannelsen banede vejen for at jeg i dag har job som konsulent på Teknologisk Institut i sektionen for Proces og Materialekemi. Her arbejder jeg med forskellige forsknings- og udviklingsprojekter, som har til formål at forbedre materialers og overfladers egenskaber inden for forskellige områder – bl.a. varmepumper og forbrugerprodukter. Det er enormt spændende og udfordrende at få lov til at bruge sin viden og uddannelse inden for materialekemi til at hjælpe virksomheder med at forbedre konkrete produkter, der er en del af folks hverdag. Netop dét at være med til at gøre en forskel, der har indflydelse på samfundet, er enormt motiverende for mig og gør, at hver dag på arbejdet er både sjov og udfordrende.



Foto: Teknologisk Institut

ORDLISTE

Autoklav – <i>Autoclave</i>	Krystallografi – <i>Crystallography</i>
Bor-hydrid – <i>Borohydride</i>	Krystalstruktur – <i>Crystal structure</i>
Brændselscelle – <i>Fuel cell</i>	Krystalsystem – <i>Crystal system, Lattice system</i>
Differential-termisk analyse – <i>Differential thermal analysis</i>	Kubisk – <i>Cubic</i>
Diffraction – <i>Diffraction</i>	Kuglemølle – <i>Ball mill</i>
Diffraktionsmønster – <i>Diffraction pattern</i>	Ledningsevne – <i>Conductivity</i>
Diffraktometer – <i>Diffractometer</i>	Legering – <i>Alloy</i>
Dotering – <i>Doping</i>	Ligand – <i>Ligand</i>
Egenskaber – <i>Properties</i>	Magnetisme, magnetisk – <i>Magnetism, Magnetic</i>
Elektronmikroskopi – <i>Electron microscopy</i>	Mekano-kemisk – <i>Mechano-chemical</i>
Elektrontæthed – <i>Electron density</i>	Metalcenter – <i>Central metal atom</i>
Faststof-diffusion – <i>Solid state diffusion</i>	Metallisk – <i>Metallic</i>
Faststof-NMR – <i>Solid state NMR (Nuclear Magnetic Resonance)</i>	Monoklin – <i>Monoclinic</i>
Faststof-syntese – <i>Solid state synthesis</i>	Monokromatisk – <i>Monochromatic</i>
Gitter – <i>Lattice</i>	Nanopartikel – <i>Nanoparticle</i>
Goniometer – <i>Goniometer</i>	Ortorombisk – <i>Orthorhombic</i>
Grundstof-analyse – <i>Elemental analysis</i>	Polymorf – <i>Polymorph, polymorphism</i>
Halvleder – <i>Semiconductor</i>	Porosimetri – <i>Porosimetry</i>
Hexagonal – <i>Hexagonal</i>	Porøse materialer – <i>Porous materials</i>
Hydrid – <i>Hydride</i>	Refleks – <i>Reflection (X-ray reflection)</i>
Højtrykssyntese – <i>High pressure synthesis, Ultra-high pressure synthesis</i>	Solvothermal (se evt. også "Hydrothermal") – <i>Solvothermal, Hydrothermal</i>
Hårdhed – <i>Hardness</i>	Suspension – <i>Suspension</i>
Induceret koblet plasma – <i>Inductively Coupled Plasma (ICP); ICP optical emission spectroscopy</i>	Termisk – <i>Thermal</i>
Intermetallisk – <i>Intermetallic</i>	Termoelektrisk – <i>Thermoelectric</i>
Ionforbindelse – <i>Ionic compound</i>	Termogravimetrisk – <i>Thermogravimetric, Thermogravimetry</i>
Ionleder – <i>Ion conductor</i>	Termokemisk – <i>Thermochemical</i>
IR spektroskopi – <i>Infrared spectroscopy</i>	Tetragonal – <i>Tetragonal</i>
Katalysator – <i>Catalyst</i>	Trigonal – <i>Trigonal</i>
Keramisk stof, keram – <i>Ceramic</i>	Triklin – <i>Triclinic</i>
Krystalfase – <i>Crystal phase</i>	UV/VIS spektroskopi – <i>Ultraviolet-Visible spectroscopy</i>
Krystalgitter – <i>Crystal lattice</i>	
Krystallinitet – <i>Crystallinity</i>	
Krystallisering – <i>Crystallization</i>	
Krystallitter – <i>Crystallites</i>	

MERE LÆSNING

WIKI LINKS OM MATERIALEKEMI (ENGELSK)

Bruges til at danne et overblik. Er ikke egnet som referencemateriale.

Materialevidenskab generelt: goo.gl/aJyuq

Uorganisk kemi generelt: goo.gl/kLIQqO

Nanopartikler (nanomaterialer): goo.gl/yE1Jz

Ultrastærke magneter: goo.gl/x5tmW

Halvledere: goo.gl/t8Be

Batterimaterialer (Lithium-ion): goo.gl/QIy1s

Solcellematerialer (nye og nuværende):
goo.gl/kpLHmu

KRYSTALLOGRAFI OG MATERIALEKEMI (DANSK)

Undervisningstilbud fra virksomheden Haldor Topsøe:
goo.gl/qyT1uC

Mere om Krystallografi (fra magasinet Aktuel Naturvidenskab):
goo.gl/7JWrVX

Katalysatorer: goo.gl/p3Nx7K

Uorganiske nanomaterialer: goo.gl/JZan3n

"Live"-studier af nanomaterialer i dansk erhvervsliv
(virksomheden Haldor Topsøe): goo.gl/L3b9lb

IGANGVÆRENDE FORSKNING (ENGELSK)

Center for Materialekrystallografi på Aarhus Universitet:
cmc.chem.au.dk

EKSEMPLER PÅ FAGTIDSSKRIFTER

"Nature Materials":
Den højest profilerede materialeforskning i dag
goo.gl/nYCGoa:

"Advanced Energy Materials":
Materialer der omsætter eller opbevarer energi
goo.gl/lGjoo

"Inorganic Chemistry":
Uorganisk kemi i alle facetter goo.gl/6ztMU

Det er normalt gratis at læse sammenfatningerne af alle artiklerne
(kaldes for "abstracts"). De fulde artikler kan du få via din lærer gennem
Statsbiblioteket i Aarhus.

NYTTIGE LINKS HER OG NU

Studieguiden til alle bacheloruddannelser på Aarhus
Universitet: bachelor.au.dk

Læs specifikt om Bacheloruddannelsen i Kemi:
bachelor.au.dk/kemi

Bacheloruddannelsen i Kemi-Teknologi
(kombineret kemi- og ingeniøruddannelse):
bachelor.au.dk/kemi-diplomingenioer

Læs om afdelingen for Uorganisk Materialekemi på
Institut for Kemi:
goo.gl/aFPpZO

SRP-PROJEKTER:

For eksempel "Syntese af en højtemperatur-superleder" eller "Syntese
af et termoelektrisk materiale"
(inkl. fremstilling af et termoelektrisk modul):
goo.gl/KwLPS4

BESØGSSERVICE:

Få en hel dag på Institut for Kemi sammen med din klasse (intro til stu-
dier, rundvisninger, laboratoriearbejde, forelæsninger, klasseøvelser):
goo.gl/LhIhai

DET RULLENDE UNIVERSITET:

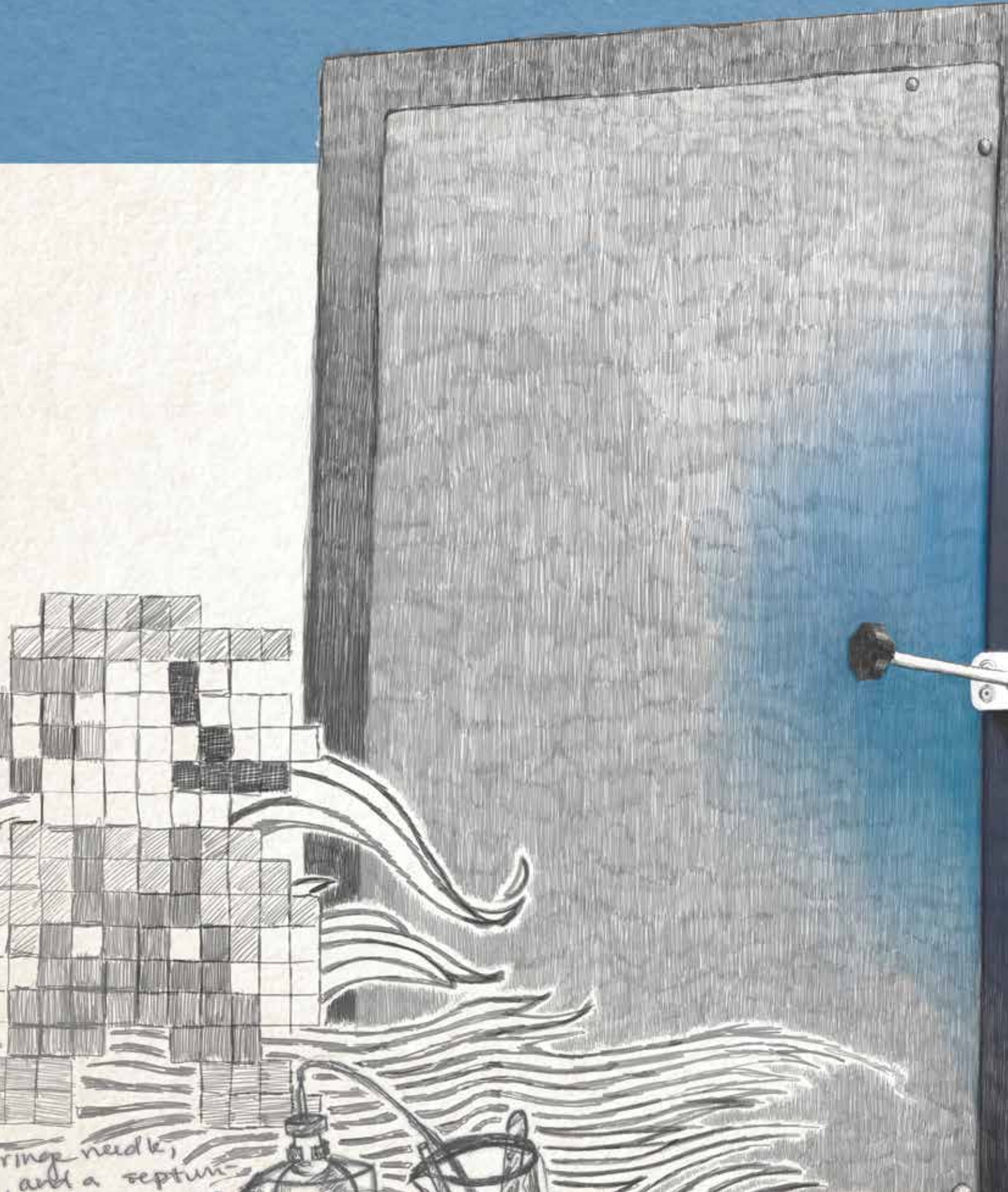
Få universitetets studerende til at komme ud og undervise
dit gymnasium en hel dag: goo.gl/Z9Kxyo

ANDRE LINKS

"Uorganisk kemi" på Den Store Danske Netordbog:
goo.gl/VXKkl6

Browsing i grundstofferne og deres forbindelser (ENG):
goo.gl/iU9MR8

Browsing i grundstoffernes krystalstrukturer (ENG):
goo.gl/KcAuUM



ring stand,
and a septum