

# Hydrogen - fremtidens grundstof

Forskning i unikke hydrogenholdige forbindelser kan føre til nye teknologiske fremskridt inden for forskelligartede områder som hydrogenopbevaring, nye typer af faststof-batterier og højtemperatur superledere.

Af Torben R. Jensen, Det Interdisciplinære Nanoscience center (iNANO) og Institut for Kemi, Aarhus Universitet

Hydrogen er det mest simple grundstof, men nok også dét der kan danne flest forskellige typer af kemiske bindinger, og hydrogen danner kemiske forbindelser med næsten alle andre grundstoffer.

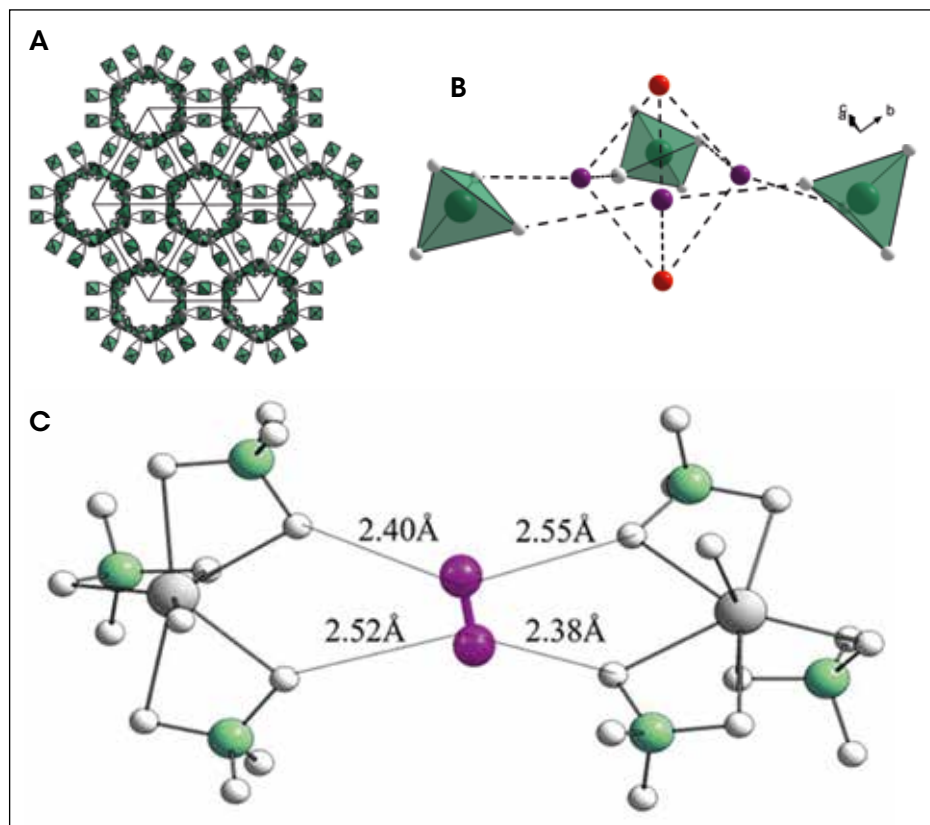
Det seneste i rækken af nye typer af bindinger er et penta-dihydrogen cluster med hexa-hydrogen bindinger, som bliver diskuteret nedenfor [1]. Det giver inspiration til at udvikle nye faste stoffer med et højt hydrogenindhold, som måske kan finde anvendelser inden for opbevaring af vedvarende energi i form af hydrogen. Senest har det vist sig, at forbindelser med et ekstremt højt hydro-

genindhold kan fremstilles under højt tryk, kaldet "superhydrider". Nogen af disse forbindelser har unikke egenskaber såsom højtemperatur superledning. Nye forskningsresultater fra de seneste år har vist, at hydrider kan have meget høj ionledningsevne også for divalente kationer, såsom  $Mg^{2+}$  og  $Ca^{2+}$ . Det har kastet nyt lys over mulighederne for at lave faststof magnesium og calciumbatterier, da ionledningsevnen er exceptionelt høj.

## Hydrogen adsorberet i et nano-porøst metalborhydrid

Magnesium tetrahydridoborat kendes på syv forskellige krystallinske former, og én af dem,  $\gamma$ - $Mg(BH_4)_2$ , er nano-porøs med cirka 30 procent åbent rum i det faste stof. Denne polymorf blev opdaget i 2010 på Institut for Kemi ved Aarhus Universitet og blev strukturelt undersøgt. Strukturen indeholder et 3-dimensionelt net af kanaler med en porediameter på  $\sim 9$  Å og mindre åbninger på  $\sim 5.8$  Å, som sætter forbindelsen i stand til at adsorbere mindre molekyler såsom dichlormethan ( $CH_2Cl_2$ ), nitrogen ( $N_2$ ) og hydrogen ( $H_2$ ). Det porøse stof,  $\gamma$ - $Mg(BH_4)_2$ , udmærker sig ved at have en delvist negativ indre overflade dannet af  $B-H^{\delta-}-Mg$  bindinger.

Tidligere undersøgelser har ikke lykkedes med at lokalisere dihydrogenmolekyler med røntgenstråling, så det blev antaget, at det adsorberes på samme positioner som nitrogen, da de to molekyler har næsten samme størrelse (den kinetiske diameter er hhv.  $d(H_2/D_2) = 2.89$  Å og  $d(N_2) = 3.64$  Å). En nitrogen- og hydrogengas-adsorptionsmåling i det porøse stof,  $\gamma$ - $Mg(BH_4)_2$ , gav overraskende nok meget forskellige resultater og antydede, at der var noget "galt". Det udregnede Brunauer-Emmett-Teller (BET) specifikke overfladeareal for  $\gamma$ - $Mg(BH_4)_2$  bestemt fra en  $N_2$  isotherm



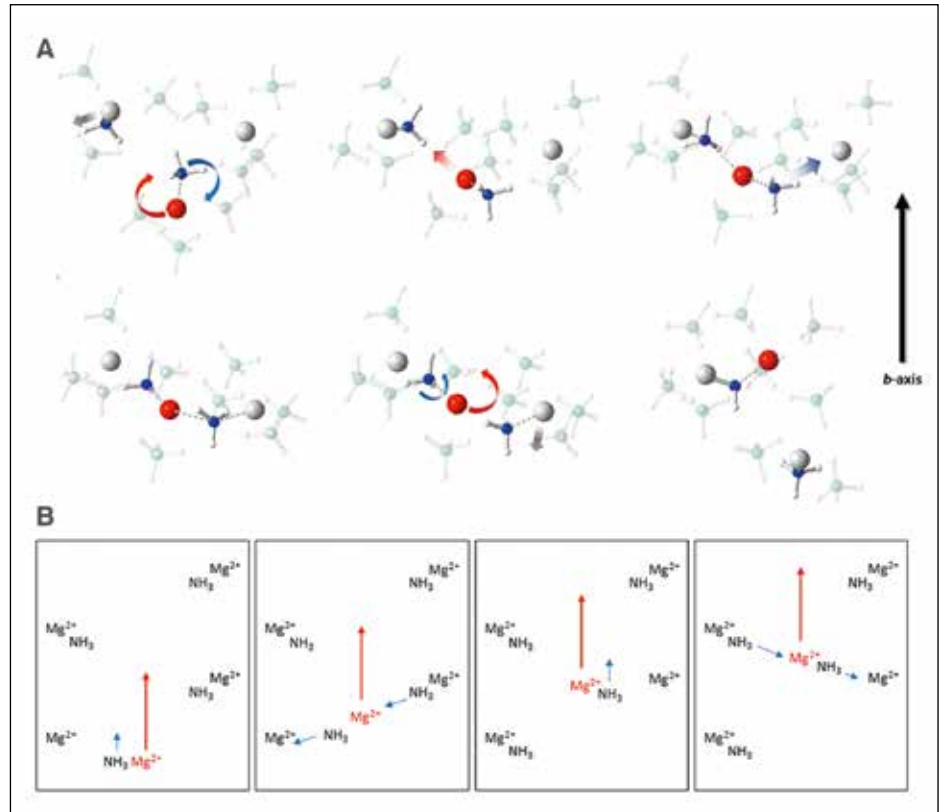
Figur 1. A) Den "tomme" nanoporøse struktur af  $\gamma$ - $Mg(BH_4)_2$ . Strukturen indeholder både store ( $\sim 9$  Å) og små kanaler ( $\sim 5.8$  Å). B) Penta-dihydrogen-enhed i strukturen af  $\gamma$ - $Mg(BH_4)_2 \cdot 2.33H_2$ . C) Hydrogenmolekylerne på position D22 danner retningsbestemte hexa-hydrogen bindinger,  $(B-H^{\delta-})_2 \cdots H-H \cdots (H^{\delta-}-B)_2$  med delvist negativt ladet hydrogen i gitterstrukturen. Figur A og B er baseret på resultater fra neutrodiffraction, hvorimod figur C er beregnet med DFT-metoder. Bor er grøn og  $BH_4^-$  er vist som tetraedere i figur A og B. Hydrogen er hvid og magnesium er vist som større grå kugler. Dihydrogenmolekyler på position D11 er vist som røde kugler og på position D22 som violette kugler i figur B, og med hydrogenatomer angivet i figur C.

målt ved 77 K er kun  $S_{\text{BET}}(\text{N}_2) = 610 \text{ m}^2/\text{g}$ , hvorimod en  $\text{H}_2$  isotherm (målt ved 20 K) giver resultatet  $S_{\text{BET}}(\text{H}_2) = 1.787 \text{ m}^2/\text{g}$  eller  $1.577 \text{ m}^2/\text{g}$ , når man bruger tværsnitsarealet for hydrogenmolekylet på flydende eller fast form [1].

Denne observation inspirerede til at fremstille en dobbelt isotopberiget variant af stoffet,  $\gamma\text{-Mg}(\text{}^{11}\text{B}\text{D}_4)_2$ , som tillader, at man kan lave neutrondiffraktion og undersøge mere nøjagtigt, hvor  $\text{N}_2$  og  $\text{H}_2/\text{D}_2$  i virkeligheden sidder i det nanoporøse stof. Det viste sig hurtigt, at hydrogen adsorberes på andre positioner end nitrogen. Nitrogen foretrækker at sidde midt i en pore så langt fra strukturen af  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2$  som muligt, hvorimod hydrogen gerne vil placere sig tættere på. Den nye hydrogenposition (kaldet D11) tillader et maksimalt hydrogenindhold svarende til  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 1,33\text{H}_2$ , hvorimod nitrogenpositionen tillader færre molekyler, svarende til sammensætningen  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 2/3\text{N}_2$ . Yderligere forsøg med neutrondiffraktion ved højere partialtryk af hydrogen ( $T = 25 \text{ K}$  og  $p(\text{D}_2) = 203 \text{ mbar}$ ) har dog vist, at der findes endnu en position, hvor hydrogen kan adsorberes (kaldet D22). De krystallografiske data viser således, at det nanoporøse stof,  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2$ , kan optage 2,33 dihydrogenmolekyle per formelenhed svarende til sammensætningen  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 2,33\text{H}_2$ , og at dihydrogenmolekyler på de to positioner er organiseret i trigonal bipyramidale enheder, kaldet penta-dihydrogen cluster. Det svarer til 8,0 wt% dihydrogen adsorberet i det porøse stof og et totalt hydrogenindhold på 21,7 wt%.

Dihydrogenmolekyler, der er adsorberet, er utrolig tæt pakket svarende til cirka 144 gram  $\text{H}_2$  per liter pore rumfang. Det er dobbelt så tæt pakket som i rent flydende hydrogen, der har densiteten,  $\rho(\text{H}_2) = 71 \text{ g/L}$ . Den meget tætte pakning af dihydrogenmolekyler fortæller, at der er kort afstand mellem dem og også kort afstand til gitterstrukturen i det porøse stof [1].

Strukturen af  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 2,33\text{H}_2$  er efterrationaliseret med computerberegninger, kaldet density functional simulations (DFT). Det viser sig, at dihydrogen adsorberes tæt på hydrogen i gitterstrukturen (korteste afstand,  $\text{H} \cdots \text{H}_2$  er 2.69 Å), og at der er kort afstand mellem molekylerne i penta-dihydrogen enhederne mellem gitterstrukturen (korteste afstand, D11  $\cdots$  D22 er 2.64 Å). Den sidste afstand svarer til afstanden mellem dihydrogenmolekyler,  $\text{H}_2 \cdots \text{H}_2$ , i fast hydrogen, som er 2.66 Å (ved et tryk på 5.4 GPa).



Figur 2. Illustration af hvordan en "ekstra" (interstitiel) magnesium ion ( $\text{Mg}^{2+}$ , rød) kan bevæge sig igennem det faste stof,  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3$ , langs  $b$ -aksen i strukturen ved at låne ammoniakmolekyler. Øverst: Detaljerede "snapshots", der viser den strukturelle fleksibilitet i stoffet  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3$ , som dels skyldes de svage di-hydrogenbindinger, men også den fleksible ligand,  $\text{BH}_4^-$ . Den sammensatte ion,  $\text{BH}_4^-$ , kan koordinere til magnesium via et hjørne, en kant, eller en flade, og det kan ændres ved rotation eller forskydning i det faste stof. Nederst: Skematisk illustration af en magnesium ion (rød), der bevæger sig igennem  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3$ . Den interstitielle magnesium ion (rød) koordinerer til et ammoniakmolekyle ( $\text{NH}_3$ ) og tager et par "dansetrin" fremad. Så leveres  $\text{NH}_3$  tilbage til sin oprindelige partner (en magnesium ion i gitterstrukturen, grå). Herefter låner det interstitielle magnesium et nyt  $\text{NH}_3$ -molekyle og tager et par hop fremad i strukturen. Denne nye mekanisme for kationledningsevne i fast stof minder om en dans (*pas-de-deux*) [2]. Farvekode: H er hvid, B grøn, N blå, Mg i gitterstrukturen er grå, og det interstitielle magnesium er rød. Figuren er reproduceret fra reference [2] med tilladelse fra "the Royal Society of Chemistry".

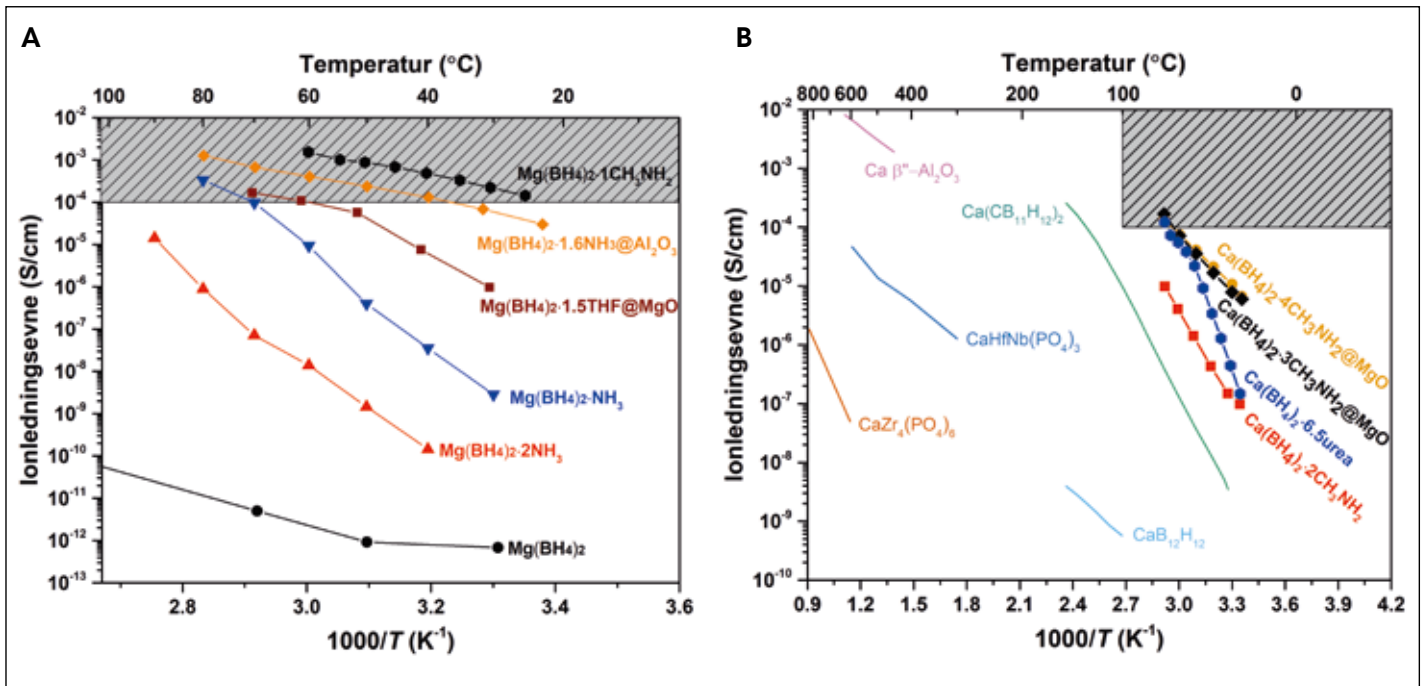
Beregningerne viser også, at hydrogenmolekyler binder sig forskelligt i det faste stof. Hydrogenmolekyler på position D11 kan rotere frit om deres massemidtpunkt, og er bundet til det faste stof med ikke-retningsbestemte dispersionskræfter (van der Waals vekselvirkninger). Hydrogen på position D22 derimod, er bundet med veldefinerede retningsbestemte bindinger og er placeret en smule tættere på gitterstrukturen i det porøse stof  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2$  end hydrogen på position D11. Det skaber en elektrostatisk vekselvirkning mellem hydrogen (D22) og den delvist negativt ladede gitterstruktur  $\text{B}-\text{H}^{\delta-} \cdots \text{H}_2$ . Faktisk dannes der hexa-hydrogenbindinger,  $(\text{B}-\text{H}^{\delta-})_2 \cdots \text{H}-\text{H} \cdots (\text{H}^{\delta-}-\text{B})_2$ , med en samlet bindingsstyrke på 8.5 kJ/mol [1].

Computerbaserede beregninger (DFT), neutron diffraktion og gasadsorptionsmålinger viser også, at

først adsorberes dihydrogen på positionen D11 og derefter på positionen D22. Det stemmer også overens med DFT-beregninger, som viser, at når penta- $\text{H}_2$  enheden er dannet, så vindes der yderligere  $\sim 1 \text{ kJ/mol}$  per  $\text{H}_2$  molekyle i stabiliseringsenergi.

### Hydrogenopbevaring

Den nye forbindelse, som er beskrevet ovenfor,  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 2,33\text{H}_2$ , illustrerer problemet med hydrogenopbevaring som faststof. Hydrogen danner bindinger med de fleste andre grundstoffer i det periodiske system, men med meget forskellig bindingsstyrke. De polære kovalente bindinger,  $\text{B}-\text{H}^{\delta-}$ , er relativt stærke, og derfor skal  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$  varmes op til over 200 °C, før det afgiver hydrogen. På den anden side er hydrogen det mindste molekyle, vi kender med kun to elektroner, så det adsorberes med de svageste dispersionskræfter



Figur 3. Nye forbindelser med høj magnesium eller calcium ionledningsevne fremstillet ved Institut for Kemi og iNANO, Aarhus Universitet (data vist som punkter). Kationledningsevnen,  $\sigma(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+})$ , er vist med en logaritmisk 2.-akse og som funktion af reciprok temperatur ( $1/T$ ) og hældningen af linjen angiver aktiveringsenergien,  $E_a$ , for processen. Det skraverede område viser, hvor batterianvendelser begynder at være realistisk,  $\sigma(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}) > 10^{-4} \text{ Scm}^{-1}$ . (A) Magnesium ionledningsevne for  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$  og nogen afledte forbindelser som funktion af temperaturen. (B) Calcium ionledningsevne for nogen forbindelser afledt af  $\text{Ca}(\text{BH}_4)_2$  (punkter) sammenlignet med nogen kendte forbindelser (streger) som funktion af temperaturen.

sammenlignet med større molekyler. Derfor afgives hydrogen adsorberet på position D11 og D22 i  $\gamma\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 2,33\text{H}_2$  ved lave temperaturer ( $T < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , afhængigt af partialtryk af hydrogen).

## Nye ionledende stoffer

En anden polymorf af magnesium tetrahydridoborat,  $\alpha\text{-Mg}(\text{BH}_4)_2$ , har en mere tæt struktur, men kan reagere med ammoniak og danner forbindelsen  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3$ . Det var en stor overraskelse, at denne forbindelse har en høj magnesium ionledningsevne,  $\sigma(\text{Mg}^{2+}) = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ Scm}^{-1}$  ( $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ), da  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$  selv er en isolator. Derfor blev forbindelsen  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3$  underkastet en grundlig undersøgelse med DFT [2]. Krystallografisk undersøgelse viser, at denne forbindelse indeholder kæder af  $\text{Mg}^{2+}\text{-BH}_4\text{-Mg}^{2+}\text{-BH}_4\text{-}$  holdt sammen af dihydrogenbindinger,  $\text{N-H}^{\delta+} \cdots {}^{\delta-}\text{H-B}$ , som kan dannes, når et fast stof indeholder både hydrogen bundet til et mere elektronegativt grundstof, her nitrogen, og mindre elektronegativt, som bor. Så vil det faste stof også indeholde delvist positivt ladet hydrogen,  $\text{N-H}^{\delta+}$ , og delvist negativt ladet hydrogen,  ${}^{\delta-}\text{H-B}$ .

DFT-beregninger viser, at dihydrogenbindingen har en bindingslængde på  $\sim 2 \text{ \AA}$  og styrke på  $\sim 20 \text{ kJ/mol}$ . Det er det samme som den velkendte hydrogenbinding, der findes i næsten alt biologisk stof og bidrager til den tertiære struktur af proteiner og biologiske stoffers strukturelle fleksibilitet. På samme måde bidrager dihydrogenbindinger i strukturen af  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3$  også til strukturel fleksibilitet, når et "ekstra" interstitielt  $\text{Mg}^{2+}$  bevæger sig igennem strukturen. Ydermere har DFT vist, at ammoniak hopper fra magnesium i gitterstrukturen og koordinerer det interstitielle  $\text{Mg}^{2+}$  og hjælper dette  $\text{Mg}^{2+}$  med at hoppe fremad i strukturen, inden det ( $\text{NH}_3$ ) vender tilbage til sin oprindelige partner og det interstitielle  $\text{Mg}^{2+}$  "låner" det næste  $\text{NH}_3$ . Vi mener, at der er tale om en ny mekanisme for kationledning i fast stof (kaldet "ligand assisted

## Hydrider som batterimaterialer

Inden for de seneste par år er en række nye hydrogenholdige kemiske forbindelser blevet opdaget og har vist sig at have meget høj kationledningsevne. Høj ledningsevne ved moderat temperatur af monovalente ioner, såsom  $\text{Li}^+$  eller  $\text{Na}^+$ , er velkendt, men meget sjældent eller ikke-eksisterende for divalente kationer, såsom  $\text{Mg}^{2+}$  og  $\text{Ca}^{2+}$ . Ovenfor beskrives den delvist åbne og fleksible struktur af hydrider som en af årsagerne til den høje kationledningsevne, men der er også andre interessante egenskaber. Når man blander to kemiske stoffer, vil blandingen ofte have egenskaber svarende til gennemsnittet af de to komponenter, men hvis man blander  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3$  (40%) og  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 2\text{NH}_3$  (60%), så får man en komposit med sammensætningen  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 1,6\text{NH}_3$ , der har cirka 100 gange højere  $\text{Mg}^{2+}$  kation ledningsevne [3]. Det kan måske skyldes, at overfladen mellem krystallitterne har høj ledningsevne. Denne blanding er eutektisk smeltende (ved  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ), men smelten kan stabiliseres af elektrisk isolerende og inerte nanopartikler (for eksempel  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), så der dannes et funktionelt nanokomposit batterimateriale.

Det interessante er, at aktiveringsenergien for kationmigration er mindre end for de rene stoffer. Derfor er ledningsevnen højere ved lave temperaturer, som ellers er meget vanskeligt at opnå. Bemærk data for  $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot 1,6\text{NH}_3 @ \text{Al}_2\text{O}_3$  i figur 3A. Ved anvendelse af disse principper har vores forskningsgruppe ved Institut for Kemi og iNANO vist, at vi kan lave nye faststof  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$  og  $\text{Mg}^{2+}$  ionledere, der også kan danne basis for helt nye faststof-batterier, som også er beskrevet i ref. [4]. Figur 3B viser, at vi også har opdaget helt nye calciumborhydrider med højere ionledningsevne ved lavere temperaturer end andre kendte forbindelser.



cationic conductivity”), og har observeret noget tilsvarende for andre forbindelser [2]. Forbindelsen  $MgCl_2 \cdot 2NH_3$ , som ikke har dihydrogenbindinger, blev også undersøgt, og det viste sig, at det er en isolator.

### Nye superledende superhydrider

Opdagelsen af superledning i forbindelsen svovltrihydrid,  $H_3S$ , ved lavere temperatur end  $T_c \sim 203$  K og et ekstremt højt tryk på 200 GPa, blev starten på et ”hydrid rush”, hvor hydrider med højere hydrogenindhold, end man normalt kender til (kaldet ”superhydrider”), blev undersøgt [5]. Et stort antal forskere har kastet sig over at forudsige nye forbindelser med et unaturligt højt hydrogenindhold ved brug af computerbaserede metoder. Disse foreslåede forbindelser har kun i meget få tilfælde kunnet fremstilles og undersøges eksperimentelt og kun under helt ekstreme tryk og lave temperaturer. Det er dog lykkedes at fremstille nogle få superhydrider af sjældne jordarter, så som lanthan decahydrid,  $LaH_{10}$ . Denne forbindelse danner en kubisk struktur, hvor lanthan er placeret i clathratlignende bure opbygget af 32 hydrogenatomer [6]. Bindingsafstanden mellem hydrogen, H–H, er sammenlignelig med den forventede afstand mellem H-atomer i metallisk hydrogen (ved det helt ekstreme tryk 500 GPa). Så lanthan decahydrid,  $LaH_{10}$  kan siges at være ”La-doppet” metallisk hydrogen, som bliver superledende ”allerede” ved et tryk på 138 GPa og en kritisk temperatur  $T_c \sim 243$  K, hvor den elektriske modstand forsvinder.

Der pågår intens forskning inden for udvikling af nye superhydrider, der er stabile ved lavere tryk. Og i den forbindelse kom den forudsagte forbindelse  $LaBH_8$  i fokus [7]. Denne forbindelse er beregnet til at være stabil ved 40 GPa og skulle have overgangstemperatur til superledning ved  $T_c \sim 126$  K. Stoffet har også en sodalit-lignende gitterstruktur af metallisk hydrogen, hvori lanthan og bor-atomer er placeret.

### Konklusion

Hydrogen er det stof, der har det højeste vægtmæssige energiindhold overhovedet (120 MJ/kg), så der er store perspektiver i at udnytte  $H_2$  til energiopbevaring. Nye kemiske forbindelser med stort hydrogenindhold kan skabe nye muligheder for opbevaring af vedvarende energi som hydrogen i et fast stof. Inden for de sidste par år er nye ”superhydrider” kommet i fokus, da de er superledende ved høje temperaturer, måske helt op til stuetemperatur. Ulempen er, at de er svære at fremstille og kun er stabile ved ekstremt høje tryk.

I dag er det velkendte litium ion-batteri nok den mest succesfulde måde til energiopbevaring, men energiindholdet er desværre cirka 80 gange mindre end benzin. Derfor er der stort fokus på at udvikle helt nye typer af batterier baseret på grundstoffer, vi har rigeligt af, såsom magnesium og calcium. Her har hydrogenholdige forbindelser kastet helt nyt lys over udviklingen af faststof-batterier, idet nogle forbindelser har ekstremt høj magnesium- eller calcium-ionledningsevne. Forskning i helt nye typer af hydrogenholdige forbindelser kan føre til nye teknologier, vi ikke kan forestille os i dag.

Acknowledgement: Danmarks Frie Forskningsfond | Tematisk forskning - Grøn omstilling via Calcium Metal Battery - CaMBat (DFF - 0217-00327B) og Solid-State Magnesium Batteries - SOS-MagBat (9041-00226B), og Vilum Fonden (VIL40717) takkes for støtte til dette videnskabelige arbejde.

E-mail:  
Torben R. Jensen: [trj@chem.au.dk](mailto:trj@chem.au.dk)

### Referencer

1. **Ultra-dense hydrogen in small pore hydridic framework.** H. Oh, N. Tumanov, V. Ban, X. Li, B. Richter, M.R. Hudson, C.M. Brown, G.N. Iles, D. Wallacher, S.W. Jorgensen, L. Daemen, R. Balderas-Xicohtencatl, Y. Cheng, A.J. Ramirez-Cuesta, M. Heere, M. Hirscher, T.R. Jensen, Y. Filinchuk, *Nature Chemistry*, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41557-024-01443-x>.
2. **The mechanism of  $Mg^{2+}$  conduction in ammine magnesium borohydride promoted by a neutral molecule.** Y. Yan, W. Dononelli, M. Jørgensen, J.B. Grinderslev, Y.-S. Lee, Y.W. Cho, R. Černý, B. Hammer, T.R. Jensen, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2020, 22, 9204-9209. DOI: 10.1039/D0CP00158A.
3. **Ammine Magnesium Borohydride Nanocomposites for All-Solid-State Magnesium Batteries.** Y. Yan, J.B. Grinderslev, M. Jørgensen, L.N. Skov, J. Skibsted, T.R. Jensen, *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3, 9264-9270. <https://dx.doi.org/10.1021/acsaem.0c01599>.
4. **På vej mod faststofbatterier.** M.B. Amdisen, T.S.S. Kjær, L.G. Kristensen, J.B. Grinderslev, L.N. Skov, T.R. Jensen, *Aktuel Naturvidenskab*, 2023, 5, 27-31.
5. **Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system.** A.P. Drozdov, M. I. Erements, I.A. Troyan, V. Ksenofontov, and S.I. Shylin, *Nature* (London) 2015, 525, 73-76.
6. **High-temperature superconductivity on the verge of a structural instability in lanthanum superhydride.** D. Sun, V.S. Minkov, S. Mozaffari, Y. Sun, Y. Ma, S. Chariton, V.B. Prakapenka, M.I. Erements, L. Balicas, F.F. Balakirev, *Nature Comm.*, 2021, 12, 6863. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26706-w>.
7.  **$LaBH_8$ : Towards high- $T_c$  low-pressure superconductivity in ternary superhydrides.** S. Di Cataldo, C. Heil, W. von der Linden, and L. Boeri, *Phys. Rev. B* 2021, 104, L020511, DOI: 10.1103/PhysRevB.104.L020511.

## OTTO – DIGITAL SERVICE FRA BUSCH

OTTO overvåger dine vakuumpumper, overalt, når som helst.

Se tilstanden af din proces eller vakuumpumper med vores digitale service.

OTTO sender automatisk beskeder til Busch i tilfælde af forstyrrelser i din proces.

Oplev fordelene af tilstandsovervågning.

Busch Vakuumenteknik A/S  
87 88 07 77  
[info@busch.dk](mailto:info@busch.dk)  
[www.buschvacuum.com](http://www.buschvacuum.com)

**U**  
**BUSCH**  
VACUUM SOLUTIONS