

Ammoniak som grønt brændstof



A close-up photograph of several purple flowers, likely from a pea plant, with green stems and leaves. The flowers are in various stages of bloom, with some fully open and others as buds. The background is a soft-focus field of similar flowers.

*Naturen inspirerer forskerne:
Rodbakterier har opskriften
på miljøvenlig ammoniak.*

Kendt molekyle bliver nyt brændstof

Ammoniak er velkendt fra kunstgødning, men mindre kendt for sine gode egenskaber som brændstof. Det lille molekyle frigiver store mængder energi og udleder ingen CO₂ ved forbrænding. Forskerne vil fremstille ammoniak med energi fra sol og vind. Rodbakterier i ærteblomster har måske svaret på, hvordan det skal gøres.

Opfindelsen, der ændrede verden:

Historien om ammoniak

93



Alternativ gødning:

Føj for en fugleklat

95



Forskernes grønne ide:

Lav ammoniak som i naturen

99



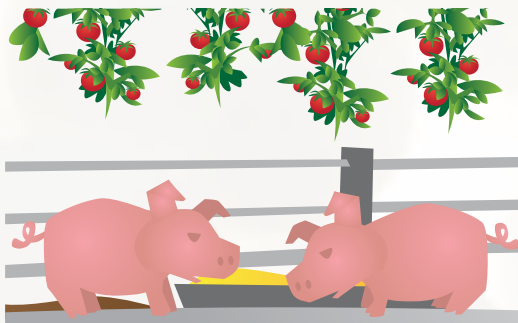
Hvad sker der i dette kapitel?

- Nitrogen indgår i et vigtigt kredsløb mellem jord, planter og dyr
- Dine muskler og dit DNA indeholder nitrogen
- Nitrogen og hydrogen bliver til ammoniak ved hjælp af varme og tryk
- Ammoniak bruges til kunstgødning
- For meget gødning forurener miljøet
- Forskerne vil udvikle en ny metode til fremstilling af ammoniak
- Små, billige fabrikker skal erstatte store, energislugende ammoniak-anlæg
- Forskerne vil omdanne vindenergi til kemisk energi i ammoniak
- Ammoniak kan bruges som miljøvenligt brændstof



En grisestald, der ikke sviner

98



Danmark i front:

Ammoniak renser bilos

101



Indhold – Kapitel 5

Introduktion: Ammoniak lavet på sol og vind	90
En lille forbindelse med store muligheder	92
Mad til dobbelt så mange	92
Katte sætter skub i reaktionerne	93
Fabrikker, der kører på sol og vind	94
Det livsnødvendige nitrogen	95
Nitrogens kredsløb	96
Når miljøet får nok af gødning	98
Ammoniak som grønt brændstof	99
Forskerens udfordring:	
Fra computer til kolbe	102
Kan du arbejde som forsker?	103
Resume: En revolutionerende opfindelse	104
Det ved du nu	105
Test dig selv	105

Forskerens udfordring: 102

Steen søger hjælp
i laboratoriet



Ammoniak lavet på sol og vind

'Stik mig lige pillerne, jeg skal ud at køre.' En stolt forsker står ved sin bil og glæder sig over resultatet af sin forskning. Efter flere års hårdt arbejde er det lykkedes ham at fremstille et miljøvenligt og CO₂-frit brændstof. I stedet for benzin fylder han en skovfuld ammoniakpiller på tanken. Ammoniakken er fremstillet på en lille fabrik med energi fra vindmøller. Den glade forsker håber, at hans opfindelse kan begrænse vores brug af fossile brændstoffer og udledningen af CO₂.

I jagten på miljøvenlige brændstoffer har forskerne vendt opmærksomheden mod ammoniak. Ammoniak har den kemiske betegnelse NH₃ og består af et nitrogenatom (N) og tre hydrogenatomer (H). Når ammoniak forbrændes, frigiver det store mængder energi. Desuden indeholder ammoniak ingen carbon (C) og udleder i modsætning til benzin og diesel derfor ingen CO₂. Hvis forbrændingen sker ved lav temperatur, er de eneste restprodukter vand (H₂O) og nitrogen (N₂). Ammoniak er derfor et af fremtidens lovende brændstoffer.

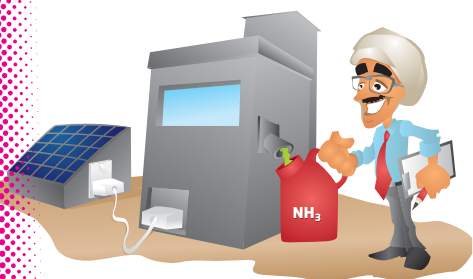
I dag fremstilles ammoniak på enorme fabrikker og med et stort forbrug af *fossile brændstoffer*. I stedet vil forskerne bruge miljøvenlig strøm fra solceller og vindmøller. Ved at omdanne den elektriske energi til *kemisk energi* i ammoniak har vi en smart metode til at gemme sol- og vindenergi til mørke nætter og vindstille dage. Desuden er det bedre at gemme energien i ammoniak end i batterier, fordi ammoniak kan indeholde mere energi.

Ammoniak fremstillet med vedvarende energi er dog stadig kun en fremtidsdrøm. I dag kræver det høje temperaturer og tryk at lave ammoniak, og det

gør det dyrt og besværligt at tænde og slukke fabrikkene. I stedet kører de i døgndrift, og det passer ikke godt til vedvarende energi, som kun er til rådighed indimellem. Men hvis forskerne kan udvikle en mindre krævende metode til at fremstille ammoniak, kan de bygge mindre apparater, der kan tændes og slukkes, alt efter om solen skinner eller vinden blæser. Dermed nærmer vi os målet med at omdanne og gemme vedvarende energi som ammoniak.

I dag fremstiller vi primært ammoniak til *kunstgødning*. Sidegevinsten ved en ny fremstillingsmetode er, at vi også kan producere kunstgødning uden at bruge fossile brændstoffer. Det er vigtigt, fordi halvdelen af al mad er dyrket ved hjælp af kunstgødning, som derfor fremstilles i enorme mængder.

I dette kapitel kan du blive klogere på forskernes arbejde med at udvikle en ny metode til fremstillingen af ammoniak. I deres søgen henter de blandt andet inspiration fra bakterier i ærteblomster. Bakterierne kan lave ammoniak helt uden de høje temperaturer og tryk. Du kan også læse mere om, hvordan det lille molekyle fremstilles i dag, og hvilken betydning det har for livet på Jorden.



Grundstoffer i dette kapitel:

C Carbon (dansk: kulstof)

er livets byggesten. For eksempel er der carbonatomer i hver eneste celle i din krop.

Fe Jern

er det mest anvendte metal i verden. Det er billigt, findes næsten overalt på Jorden, og så kan det nemt bøjes og strækkes, når det varmes op.

H Hydrogen (dansk: brint)

er det simpleste grundstof på Jorden, og alligevel er det svært at få fat på. Hydrogen findes nemlig ikke frit, men er bundet i kemiske forbindelser, for eksempel vand (H_2O). Ved hydrogen forstås normalt gassen H_2 .

N Nitrogen (dansk: kvælstof)

indgår i alle levende organismer. I atmosfæren optræder nitrogen som gassen N_2 . Bindingen mellem de to nitrogenatomer er en af de stærkeste kemiske bindinger, der findes.

O Oxygen (dansk: ilt)

er livsnødvendigt for langt de fleste organismer på Jorden. Din krop skal bruge oxygen for at forbrænde mad og få energi. Uden oxygen i atmosfæren var mennesket aldrig blevet til. Ved oxygen forstås normalt gassen O_2 .

Kemiske forbindelser i dette kapitel:

CH₄ Methan

er en gas, der blandt andet dannes af visse bakterier, når de nedbryder biologisk materiale. Methan udgør størstedelen af naturgas, som er et fossilt brændstof.

CO₂ Carbondioxid

er en tung gas, der består af et carbonatom og to oxygenatomer. Det skrives som CO_2 og sådan omtaler man også tit forbindelsen. Kuldioxid er et gammelt navn for CO_2 .

NH₃ Ammoniak

er en giftig gas med en ubehagelig lugt. Det er det næstmest producerede kemikalie i verden. Ammoniak bliver primært brugt til at lave kunstgødning, men det er også et rigtigt godt brændstof.

NH₄⁺ Ammonium

er en ion, der dannes, når ammoniak optager en ekstra hydrogenion (H^+). Ammonium dannes for eksempel i jorden, når ammoniak reagerer med vand (H_2O).

NO₃⁻ Nitrat

er en ion, der er meget vigtig for planterne. De optager nitrat fra jorden og bruger det blandt andet til at lave proteiner og DNA.



Når du møder dette symbol, skifter energi form.

Ordliste

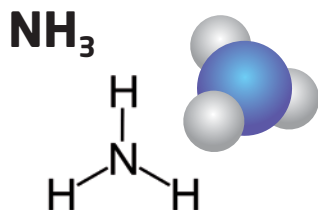
Ord i *kursiv* er forklaret i ordlisten bagerst i bogen.



Scan koden med din mobil, og besøg www.energipaalager.dk.



En lille forbindelse med store muligheder



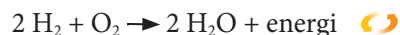
Ammoniak (NH₃) består af et nitrogenatom (blå) og tre hydrogenatomer (hvide).



Den kemiske forbindelse ammoniak (NH₃) bliver brugt mange steder i industrien, blandt andet til saltlakrids, sprængstof og kølemidler. (Ex. 5.1) I fremtiden kan ammoniak måske også blive brugt til at gemme *vedvarende energi* og som brændstof i biler. Ideen er oplagt, fordi ammoniak frigiver store mængder energi ved afbrænding.



Ammoniak kan forbrændes direkte, men en mere sandsynlig anvendelse er at spalte molekylet og bruge hydrogen som brændstof i *brændselsceller*:



Når et stof forbrændes, reagerer det altid med oxygen. Fossile brændstoffer, der bruges som brændstof i alt lige fra biler og skibe til olie- og gasfyr, indeholder carbonatomer. Ved forbrændingen reagerer carbon med luftens oxygen og danner CO₂. Ammoniak derimod indeholder ikke carbon, og forbrændingen er derfor helt fri for CO₂:

Hvis ammoniak skal bruges til at gemme vedvarende energi, skal den kemiske forbindelse altså fremstilles med energi fra eksempelvis sol og vind. Det er en stor udfordring, som vi vil undersøge nærmere. Men først ser vi på, hvordan molekylet bliver fremstillet i dag, og hvad det bruges til i dag.



Kemisk energi i hydrogen bliver til elektrisk energi fra brændselscellen.

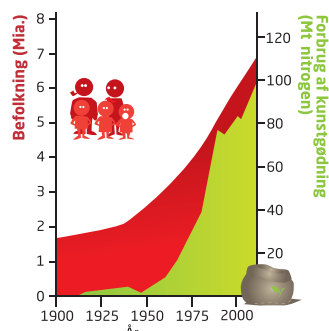
Læs mere om brændselsceller og hydrogen i kapitel 3.

Mad til dobbelt så mange

Ammoniak er måske en af de kemiske forbindelser, der har haft størst indflydelse på verdens befolkning. Næst efter svovlsyre (H₂SO₄) er ammoniak det mest producerede stof i verden målt på vægten. Ammoniak bruges primært til at lave kunstgødning, der gør det muligt at dyrke jorden mere intensivt. Kunstgødning tilfører jorden mere nitrogen, som er et vigtigt næringsstof for planterne. Et lavt indhold af nitrogen i jorden begrænser planternes vækst og dermed landbrugets udbytte.

forskellige former for naturgødning, for eksempel urin og afføring fra køer, heste og svin. Naturgødning indeholder dog ikke ret store mængder af nitrogen. Derfor fik opfindelsen af en industriel metode til fremstillingen af ammoniak stor betydning. Brugen af kunstgødning og dermed udbyttet fra landbruget steg dramatisk.

Ifølge FN's landbrugsorganisation FAO er kunstgødning med til at producere næsten halvdelen af den mad, der dyrkes på Jorden i dag, og med en befolkning, der forventes at stige til ni milliarder mennesker i 2050, er kunstgødning kommet for at blive.



Befolkningstallet og brugen af kunstgødning er vokset parallelt, siden den industrielle produktion af ammoniak begyndte i 1913. Mt står for megaton, som er en million ton.

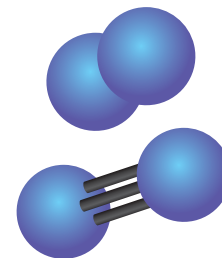
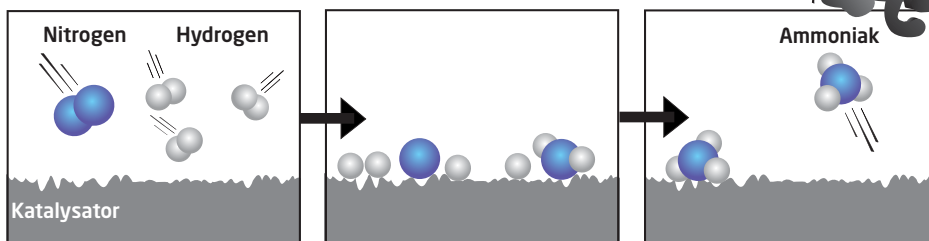
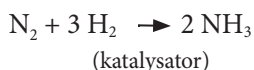
Katte sætter skub i reaktionerne

Ammoniak fremstilles ved, at gasserne nitrogen (N_2) og hydrogen (H_2) reagerer med hinanden. De to nitrogenatomer er dog bundet meget stærkt til hinanden ved en tredobbelt *kemisk binding*, også kaldet en *tripelbinding*. Det er den næststærkeste kemiske binding, der findes. Derfor kræver det meget energi at skille dem ad. (Ex. 5.2)



Energien bliver tilført i form af varme over $400\text{ }^\circ\text{C}$ og et tryk på 150 atmosfære, det vil sige et tryk, der er 150 gange højere end *atmosfærens* normale tryk. Metoden hedder *Haber-Bosch-processen*.

Ud over høj temperatur og tryk kræver Haber-Bosch en *katalysator*, det vil sige et materiale, der får den kemiske reaktion til at løbe hurtigere. Katalysatoren holder de molekyler fast, som skal reagere med hinanden. Derved svækkes molekylernes kemiske bindinger, så der lettere dannes nye forbindelser. 'Katte', som katalysatorerne også kaldes, får derved også reaktionen til at ske med lavere energiforbrug. Ofte er 'kattene' lavet af metaller. I Haber-Bosch-processen bruges en katalysator af jern:



To molekylemodeller af nitrogen (N_2) tegnet med og uden tripelbinding.



Ammoniak-katalysatoren i Haber-Bosch-processen er lavet af jern. Katalysatoren binder nitrogen og hydrogen til sin overflade, så molekylerne lettere kan reagere med hinanden.

Opfindelsen, der ændrede verden

Der er en anspændt stemning i laboratoriet. Professor Fritz Haber studerer omhyggeligt sit apparat for syttende gang, mens hans assistenter nervøst render rundt og rydder overflødige kolber af vejen. De gør klar til et vigtigt besøg fra kemikaliefabrikken BASF, som er interesseret i professor Habers opfindelse. Kemikeren Carl Bosch er blandt de besøgende, der er kommet for at se den utrolige fremstilling af ammoniak fra simple gasser. Desværre løber demonstrationen ind i startvanskeligheder. Pludselig får det høje tryk i maskinen en bolt til at flyve af apparatet. Assistenterne springer for livet, mens boltens suser gennem luften som en pistolkugle. Eksperimentet bliver forsinket og nervøsiteten stiger, men endelig er apparatet klar. I fem uafbrudte timer producerer det flydende ammoniak uden problemer.

Det var en sommerdag i 1909, at Fritz Haber viste sin opfindelse frem, og Carl Bosch så mulighederne for at udvikle den til en industriel produktion. Sammen lagde de navn til en af verdens mest betydningsfulde opfindelser: Haber-Bosch-processen. Gennem de næste 100 år bidrog den til udviklingen af landbrug og leve-standard, og i dag skaffer den mad til mere end tre milliarder mennesker. Begge mænd modtog Nobelprisen for deres arbejde.



Fabrikker, der kører på sol og vind



Ammoniakfabrik. Der findes ca. 650 ammoniakanlæg i verden. Over halvdelen af dem får deres katalysatorer fra det danske firma Haldor Topsøe.

FAKTA

Kunstgødning sælges ofte under navnet NPK-gødning.

Kik på en flaske blomstergødning derhjemme, og undersøg, hvad N, P og K står for. Hvor mange procent er der af hvert næringsstof i gødningen? Sammenlign jeres resultater i klassen.



Katalysatorer får Haber-Bosch-processen til at løbe hurtigere og bruge mindre energi. Men reaktionen mellem hydrogen og nitrogen er alligevel afhængig af høje temperaturer og tryk for at forløbe effektivt. Derfor bruges der store mængder fossile brændstoffer til at danne varme og øge trykket.

En endnu større energisluger er dog fremstillingen af hydrogen til Haber-Bosch-processen. Mens det er let at skaffe nitrogen fra luften, skal hydrogen fremstilles fra naturgas i en meget energikrævende reaktion. Naturgas er rig på methan (CH_4), som indeholder meget hydrogen. I alt står ammoniakproduktionen for over 1 % af verdens energiforbrug og mere end 1 % af verdens samlede udledning af drivhusgasser, primært i form af CO_2 .

Gennem de sidste 50 år er det lykkedes at halvere energiforbruget i processen, men nu kan det ikke blive meget mindre. Hvis forskerne derimod kan udvikle en ny metode til fremstilling af ammoniak ved lavere temperatur og

tryk, kan de bygge mindre og billigere fabrikker. Hvis fabrikkerne bliver små nok, kan de lettere startes og stoppes. Det betyder, at de fossile brændstoffer kan udskiftes med de mere skiftende mængder af vedvarende energi som sol og vind.

Mindre og billigere ammoniakfabrikker vil også gøre kunstgødning tilgængeligt for langt flere mennesker. I dag koster et ammoniakanlæg en milliard dollars at bygge. Dertil kommer det store energiforbrug, som gør anlæggene dyre i drift. Mange fattige lande har ikke råd til ammoniakfabrikker eller til at købe kunstgødning fra udlandet. De har derfor svært ved at udnytte deres landbrugsjord optimalt og producere nok fødevarer til at mætte deres befolkninger. Ideelt set kunne en lille ammoniakfabrik stå ude i små samfund og levere kunstgødning til en håndfuld landbrug. Du kan læse mere om udviklingen af den nye fremstillingsmetode senere i kapitlet. Først ser vi på, hvad planterne bruger nitrogen til.



Grøn gødning. I fremtiden kan bønder måske fremstille kunstgødning lokalt ude på markerne ved hjælp af vedvarende energi.

Det livsnødvendige nitrogen

Gødning er en blanding af forskellige næringsstoffer, som planterne har brug for i større eller mindre mængder. Næringsstofferne er nødvendige, for at planterne kan omdanne sukker fra *fotosyntesen* til proteiner, fedtstoffer, vitaminer og det grønne farvestof klorofyl. Alle næringsstofferne er vigtige, men nitrogen er blandt dem, som planterne skal bruge mest af. (Ex. 5.3)

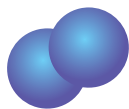


Nitrogen er essentielt for både planter, dyr og mennesker. Uden dette grundstof kan vi for eksempel ikke lave proteiner til vores muskler eller DNA, som er vores arvemateriale. Dyr og mennesker får nitrogen gennem fø-

den, hvorimod planterne optager det direkte fra jorden. Der er dog kun en begrænset mængde nitrogen til rådighed i jorden, og det sætter en naturlig grænse for planternes vækst. Derfor er gødning med nitrogen vigtig, hvis vi vil dyrke og høste flere afgrøder.

Atmosfæren består af 78 % nitrogen (N_2), så det kan virke mærkeligt, at planterne ikke har rigelig adgang til nitrogen. Men ligesom vi mennesker ikke kan udnytte luftens nitrogenmolekyler, har planterne heller ikke gavn af dem. De må i stedet optage nitrogen fra jorden. For at forstå hvordan må vi undersøge naturens nitrogenkredsløb.

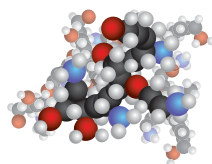
Nitrogen (N_2)




Ammoniak (NH_3)



Proteiner



Nitrogen i kemiske forbindelser. Størstedelen af Jordens nitrogen findes som N_2 i atmosfæren. Langt mindre er tilgængelig i jorden for eksempel i form af ammoniak. Proteiner findes i alle levende organismer.



Afstem reaktionen for fotosyntesen:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + O_2$$

Hvilken energiform udnytter planterne i fotosyntesen?
Tip: Se side 54



Fra fugleklatter til mad på bordet

Fra de stejle klippeøer ud for Perus kyst lyder en øredøvende skræppen. Lyden kommer fra store skarer af pelikaner, skarver og andre søfugle, som lever godt af de mange sardiner og ansjoser i området. Men når noget ryger ind, må noget også ryge ud, og det ses tydeligt på klipperne. Et tykt lag af hvide fugleklatter blandet med fjer, æggeskaller og knoglerester hober sig op i en uappetitlig pærevælling. Utroligt nok har denne uhumske blanding været en eftertragtet vare.

De sydamerikanske inkaindianere var de første, som fandt på at indsamle skidtet fra klipperne og bruge det som gødning. Guano, som det blev døbt, indeholder nemlig 13 % nitrogen samt mange andre næringsstoffer, som planterne har brug for. I midten af 1800-tallet startede Peru en eksport af guano, som fik stor betydning for landbruget i Europa, men efter kun 30 år var klipperne ribbet for de dyrebare fugleklatter. I dag sælges guano kun i begrænsede mængder, og omkring 100 mennesker i Peru er ansat til at samle og pakke fuglemøget.



Nitrogens kredsløb

Grundstoffet nitrogen er livsnødvendigt for planter, dyr og mennesker. Det findes i luften, jorden og i levende organismer. Næsten alt nitrogen findes dog i atmosfæren som N_2 , og den form kan hverken planter, dyr eller vi mennesker udnytte. Derfor er den lille mængde nitrogen, der cirkulerer mellem jord, dyr og planter, en meget vigtig del af kredsløbet. I jorden findes nitrogen blandt andet i forbindelserne ammoniak (NH_3), ammonium (NH_4^+) og nitrat (NO_3^-).

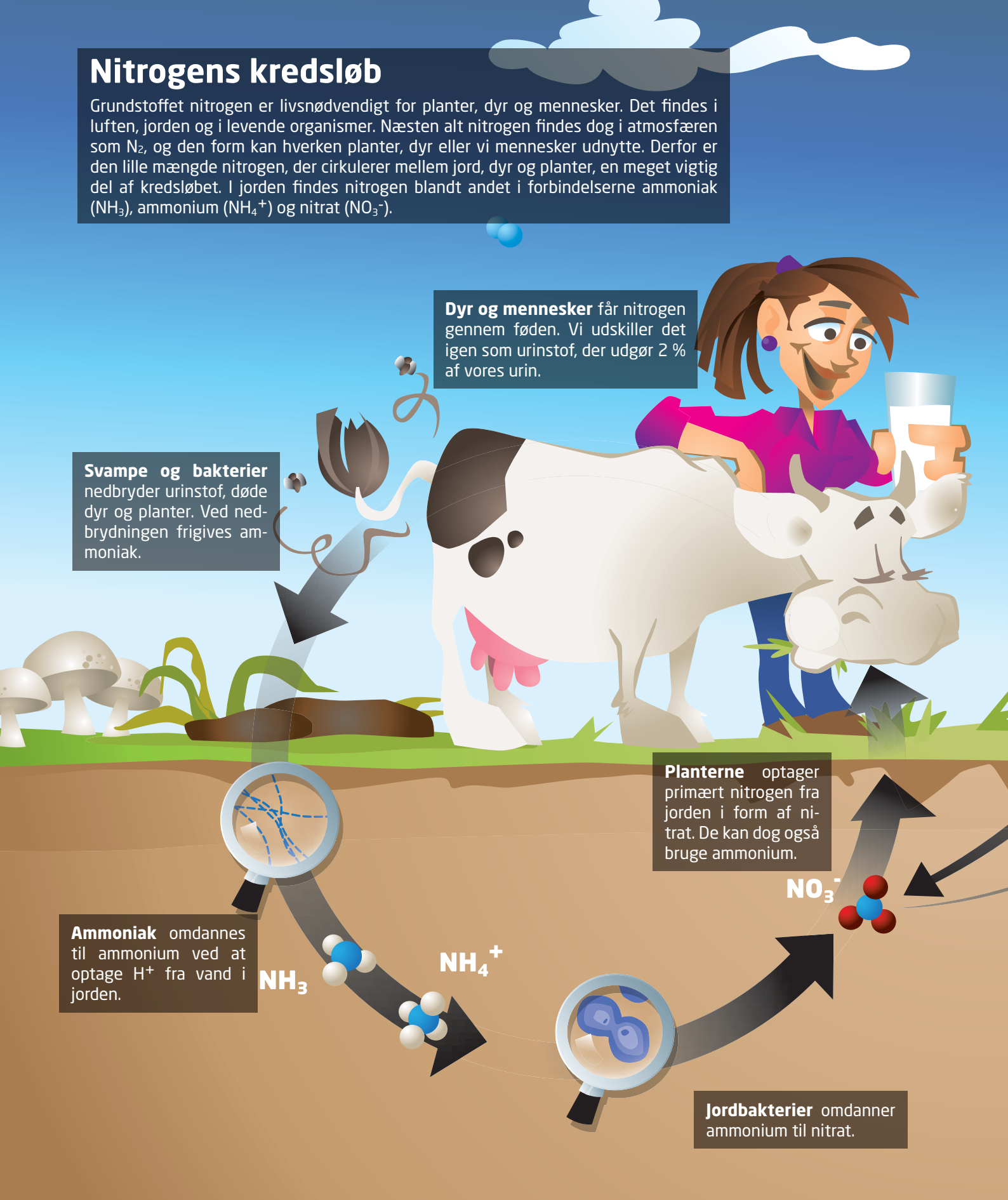
Dyr og mennesker får nitrogen gennem føden. Vi udskiller det igen som urinstof, der udgør 2 % af vores urin.

Svampe og bakterier nedbryder urinstof, døde dyr og planter. Ved nedbrydningen frigives ammoniak.

Planterne optager primært nitrogen fra jorden i form af nitrat. De kan dog også bruge ammonium.

Ammoniak omdannes til ammonium ved at optage H^+ fra vand i jorden.

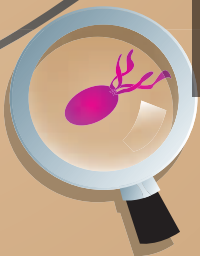
Jordbakterier omdanner ammonium til nitrat.



Lyn spalter N_2 og O_2 i luften til enkelte N- og O-atomer. Disse atomer reagerer med hinanden og med vanddamp i luften. Regnvandet fører dem ned i jorden. Her bliver der dannet nitrat, som planterne kan optage.



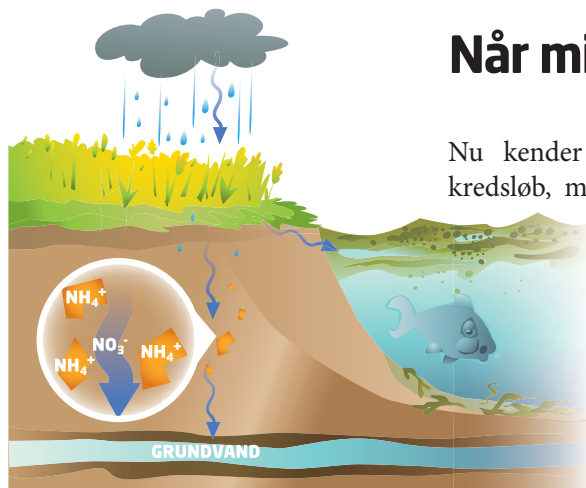
Andre bakterier fører nitrogen tilbage til atmosfæren ved at om-danne nitrat til N_2 .



Bælplanter som ærteblomst og kløver er nogle af de få planter, der kan udnytte N_2 direkte fra luften. Planterne har et særligt samarbejde med bakterier i deres rødder. Bakterierne får deres energi fra planterne og laver til gengæld N_2 fra luften om til ammoniak. Ammoniak bliver til ammonium, som planterne kan optage og dermed dække deres behov for nitrogen.

Bakterierne laver ammoniak ved atmosfærisk tryk og normal temperatur. Ammoniakfabrikkerne derimod bruger over $400\text{ }^\circ\text{C}$ og 150 atmosfære. Forskere er derfor meget interesserede i at gøre bakterierne kunsten efter.

Når miljøet får nok af gødning



Udvaskning. Ammonium (NH_4^+) binder sig til jordpartikler. Det gør nitrat (NO_3^-) derimod ikke. Derfor bliver det let udvasket med regnvandet.

FAKTA

I skoven udvaskes der mindre end 5 kg nitrogen om året per hektar. Fra landbrugsjord bliver der i gennemsnit udvasket 76 kg.

Nu kender du nitrogens naturlige kredsløb, men det er også vigtigt at forstå, hvordan menneskets brug af gødning påvirker kredsløbet. Gødning øger mængden af næringsstoffer i jorden, men desværre ikke kun på de marker, hvor de bliver spredt.

Nitrat er et næringsstof, der let siver fra nyligt gødede marker ud i det omgivende miljø. Når det regner, siver nitrat med det overskydende vand ud i åer, søer og have. Normalt er der en naturlig lav koncentration af nitrat i disse vande, og det begrænser algernes vækst. Men når koncentrationen stiger voldsomt, blomstrer algerne op. I værste fald kan de lægge sig som et tæppe hen over vandoverfladen. 'Tæp-

pet' blokerer for lyset og tager livet af de planter, der lever på bunden. Derudover kan bakterier bruge så store mængder oxygen på at nedbryde de døde alger, at fisk og andre dyr kommer til at mangle ilt.

Nitrat kan også sive ned i *grundvandet* og dermed forurene vores drikkevand. Større mængder nitrat i drikkevandet er livstruende for spædbørn, og flere danske vandboringer er lukket på grund af for høje koncentrationer.

En af de vigtigste løsninger på problemerne med nitrat er at tilpasse mængden af gødning til det, planterne på markerne kan nå at optage. Mindre brug af kunstgødning vil samtidig gavne miljøet, fordi fabrikkerne udleder mindre CO_2 , når der bliver produceret mindre ammoniak.

Glade grise og gylle uden forurening


Du må ikke blande kød og grøntsager på skærebrættet hjemme i køkkenet, men i Århus har en opfindsom landmand samlet grise og tomater på tegnebrættet. I en bygning, han kalder Pig-City, vil han opdrætte grise i underetagen og dyrke tomater i et drivhus i overetagen. Det hele foregår CO_2 -neutralt og uden at forurene miljøet med for mange næringsstoffer. *Gyllen* fra grisene skal laves til el og varme i et *biogasanlæg*, som opvarmer drivhuset. De rester, der bliver tilbage, skal gøde tomaterne. Alle affalds- og næringsstoffer bliver altså udnyttet.

Projektet har mødt stor interesse fra både politikere og landbrug. Det har også fået opbakning fra Dyrenes Beskyttelse. Grisene får nemlig lov at gå frit rundt i bygningen og bliver desuden slagtet i naboet, så de undgår transport. Byggeriet af Pig-City starter dog tidligst i 2012, da både finansiering og sagsbehandling skal være på plads først. Projektet er nemlig fuldt af nye aspekter, som myndighederne ikke har set før.

Ammoniak som grønt brændstof

Vedvarende energikilder er flygtige energikilder. Vi kan ikke regne med, at de er til rådighed døgnet eller året rundt. Derfor har vi brug for at kunne gemme energien. En række forskere i CASE-projektet på DTU har sat sig for at bruge ammoniak til at gemme vedvarende energi. På den måde kan vi udnytte sol, vind og bølger mere effektivt. Samtidig får vi et miljøvenligt brændstof, der ikke udleder CO₂. Som nævnt tidligere i kapitlet kan vi nemlig bruge ammoniak som brændstof, for eksempel ved at forbrænde hydrogen i brændselsceller både på fabrikker og i biler.

For helt at undgå at udlede CO₂ ved fremstillingen af ammoniak er det nødvendigt at fremstille hydrogen uden at bruge det fossile brændstof naturgas. I stedet kan man spalte vand til hydrogen og oxygen ved hjælp af elektricitet. Processen hedder *elektrolyse*.

For at omdanne vedvarende energi til ammoniak prøver forskerne at udvikle nye katalysatorer, så fremstillingen kan ske uden høje temperaturer og tryk. De mildere betingelser betyder, at ingeniørerne kan bygge mindre krævende ammoniak anlæg. Fordelen ved disse er, at de kan tændes og slukkes afhængigt af mængden af vedvarende energi. Når vindmøller og *solceller* producerer mere strøm, end der er brug for, startes anlægget, og produktionen af ammoniak går i gang. På den måde bliver den elektriske energi lavet om til kemisk energi i ammoniak . Når det er overskyet eller vindstille, kan vi få elektricitet eller andre energiformer ved at forbrænde ammoniakken.

Forskerne skal være kreative, når de søger efter nye katalysatorer til fremstillingen af ammoniak. Måske kan de finde hjælp i naturen. Her laver bakterier nemlig ammoniak ved almindelige temperaturer og tryk.

Læs mere om elektrolyse i kapitel 3.

FAKTA

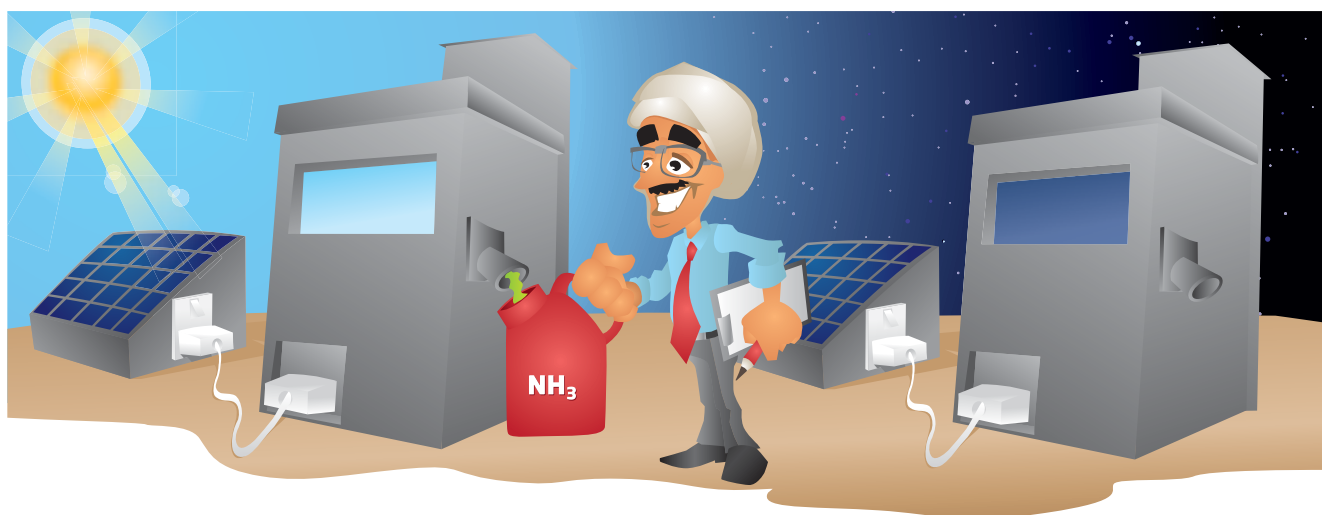
CASE står for 'Catalysis for Sustainable Energy'. På dansk betyder det 'Katalyse til vedvarende energi'.

Beskriv med dine egne ord, hvordan en katalysator virker.

Tip: Se afsnittet 'Katte sætter skub i reaktionerne'



Elektrisk energi fra vindmøller skal blive til kemisk energi i ammoniak.



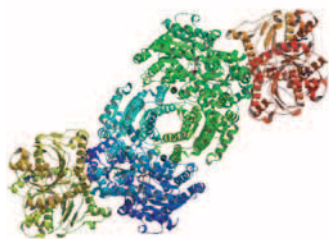
Ammoniak anlæg, der kan slukke og tænde. Forskerne vil omdanne elektrisk energi til kemisk energi i ammoniak, når solceller eller vindmøller leverer overskydende energi.



Se også filmen
'Ammoniak som grønt
brændstof'.



Bakterieknolde. Rødderne hos ærteblomster har små knolde. I knoldene lever der bakterier, som omdanner nitrogen til ammoniak.



Nitrogenase. Bakterier laver ammoniak ved hjælp af enzymet nitrogenase.

Forskerne efterligner enzymer

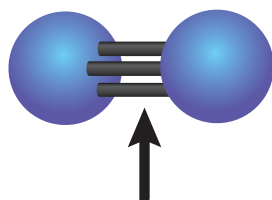
Planter kan normalt ikke udnytte nitrogen fra luften, men enkelte alger og bakterier kan faktisk omdanne nitrogenmolekyler til ammoniak. Man kan blandt andet finde disse bakterier i rødderne på bælgplanter som ærteblomster og kløver.

Mange forskere har studeret og skrevet artikler om bakteriernes metode til at lave ammoniak. Det har vist sig, at reaktionen i bakterierne sker ved hjælp af et *enzym*, der hedder nitrogenase. Enzymer er også katalysatorer, og det fascinerende ved nitrogenase er, at det kan lave ammoniak ved ganske almindelige temperaturer og tryk.

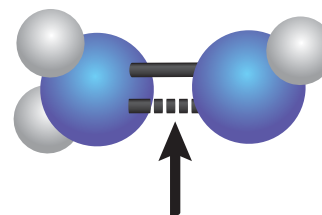
Desværre kan forskerne ikke bare erstatte de katalysatorer, man bruger på fabrikkerne, med enzymer. Det skyl-

des, at enzymer er meget skrøbelige og består af komplicerede strukturer, der kan åbne og lukke sig. Forskerne i CASE forsøger i stedet at efterligne nitrogenasen ved at ændre på den kemiske reaktion, der finder sted i Haber-Bosch-processen.

På ammoniakfabrikkerne i dag bryder man først bindingen i nitrogenmolekylerne og tilsætter derefter hydrogen. Det kræver enorme mængder energi, fordi nitrogenbindingen er så stærk. Nitrogenasen derimod starter med at tilføre hydrogenioner (H^+) og elektroner til nitrogenmolekylet. Når hydrogenionerne sætter sig på molekylet, bliver dets binding svagere og lettere at bryde. Tanken er derfor at finde en katalysator, der kan styre reaktionen, så nitrogenbindingen brydes på samme vis, som når bakterierne laver ammoniak.



Stærk binding



Svagere binding

Den kemiske binding i N_2 er en meget stærk triplebinding. Hvis man kan binde hydrogenatomer til molekylet først, bliver bindingen lettere at bryde.

Ammoniak på pilleform

For at gemme vedvarende energi som ammoniak har vi altså brug for en mindre krævende fremstillingsmetode. Desuden er det vigtigt, at vi kan opbevare ammoniak på en sikker måde, da det er et meget giftigt stof. De skrappe sikkerhedskrav til opbevaring af gas eller flydende ammoniak kan umuligt opfyldes i biler og busser. Derfor søger forskerne efter materialer, der kan binde ammoniak, så forbindelsen kan opbevares i et fast stof, for eksempel i form af piller.

Saltet magnesiumchlorid ($MgCl_2$) er et af disse pillematerialer. Det er både billigt og let at lave. Saltet består af et gitter af mange enheder af $MgCl_2$. En enhed kan binde seks molekyler am-

moniak. Derved dannes forbindelsen $Mg(NH_3)_6Cl_2$, som er et fast og sikkert materiale. Når $Mg(NH_3)_6Cl_2$ varmes op, afgiver det ammoniak som en gas. (Ex. 5.4)

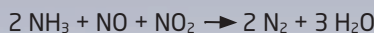
Opbevaring af ammoniak i fast stof rummer dog stadig udfordringer. For eksempel skal materialet frigive ammoniak, uden at det kræver for store mængder energi, eller at det bliver farligt at arbejde med. Der er altså stadig meget arbejde til både nuværende og kommende forskere. Til gengæld er belønningen stor til dem, der baner vejen for, at vi kan bruge ammoniak til at gemme vedvarende energi. Lykkes det, kan vi udnytte energien bedre både som strøm, varme og brændstof.



Ammoniak opbevaret i fast stof. Her illustreret i små piller.

Danmark i front: Dansk teknologi renser verdens bilos

Der går nok lidt tid, før ammoniak bliver brugt som brændstof i biler. Men faktisk bruges ammoniak allerede til at rense udstødningen på dieselmotorer. Det danske firma Amminex har nemlig udviklet systemer til at opbevare ammoniak bundet til faste stoffer i kompakte beholdere. Ammoniak bliver frigivet fra beholderen og ført hen over en katalysator i udstødningen. Derved bliver udstødningssgasen renset for de meget sundhedsskadelige gasser nitrogenoxid (NO) og nitrogendioxid (NO_2). Gasserne danner også sur regn, som ødelægger bygninger og skove. Reaktionen med ammoniak i katalysatoren er:



Amminex blev dannet i 2005 af fem forskere, der alle har studeret eller arbejdet på DTU. Siden da har firmaet haft rivende travlt. Blandt andet har det indgået en trecifret millionkontrakt med den førende lastbil- og motorproducent i Nordamerika, Navistar.

Takket være den ny teknologi opfylder lastbilerne de stramme miljøkrav, der træder i kraft i USA i 2012. De samme krav kommer i Europa i 2014. Amminex forventer, at lignende regler i resten af verden vil øge efterspørgslen på teknologien.

Forskerens udfordring: Fra computer til kolbe

Steen fortæller:

- Det er altid en udfordring at gå fra teori til eksperimenter. Man håber, at de resultater, man har regnet sig frem til, stemmer overens med det, man ser i laboratoriet. Det er vigtigt at stole på kollegerne i laboratoriet, for forskning giver ikke nogen mening uden samarbejde.

Kl. 9.09. Steen starter sin arbejdsdag. Han er forsker, men han er hverken klædt i kittel eller handsker. I dag har han jeans og skjorte på, og i hånden har han bare en kop rygende varm kaffe. Steens vigtigste redskab er heller ikke en kolbe eller et mikroskop, men derimod hans computer. Steen er nemlig teoretisk fysiker. 'Bliip'... en e-mail fortæller ham, at han kan bruge 'Niflheim' i dag.

Kl. 9.33. Lone stikker hovedet ind af døren og afbryder Steen i hans arbejde. - Har du snart nogle resultater til os? Lone er eksperimentel fysiker, det vil sige, at hun laver forsøg i labo-

ratoriet. I dag vil hun gerne afprøve nogle af Steens nye resultater.

- Næste uge, svarer Steen og griner lidt. Eksperimentelle forskere er ikke altid lige så tålmodige som de teoretiske. Men Steen ved, at det kræver mange dages beregninger, før han kan give sine resultater videre.

Kl. 10.55. Farverige modeller af ke-

miske forbindelser fylder computer-skærmen. Steen kigger særlig nøje på en af dem. Det er et materiale, der kan bruges til at opbevare ammoniak på pilleform. Han kan se molekylet i 3D og vende og dreje det med musen.



Det er interessant for hans forskning i CASE, men først skal Steen beregne, hvordan stoffet kan optage og frigive ammoniak med mindst mulig energi. Hans egen computer er dog ikke hurtig nok. Steen har brug for Danmarks hurtigste computer: Niflheim!

Kl. 13.15. På vej til frokost render Steen ind i Lone igen. En af hendes

maskiner er i stykker, og hun ærgrer sig, for hun elsker at bruge de store, avancerede maskiner. Steen driller kollegaen lidt:

- Nårh... er dit legetøj gået i stykker?
- Legetøj! Du skulle nødtigt snakke,

giver Lone igen. - Du spiller jo bare på computer hele dagen.

- Ha!, svarer Steen. - Hvis det ikke var for mine teoretiske beregninger, ville du ikke vide, hvilke eksperimenter du skulle lave.

- Okay, okay, smiler Lone - men hvis du ikke havde mine eksperimenter, ville du aldrig vide, om dine teorier holdt stik i virkeligheden.

Kl. 14.10. Steen sender sine opgaver til Niflheim. Supercomputeren fylder to rum og kan lave 56.000 milliarder regnestykker i sekundet. Alligevel bruger den to hele dage på at tygge sig igennem en enkelt af Steens opgaver.

Kl. 17.08. Telefonen ringer. Det er Lone, der spørger, om han ikke er færdig for i dag, så de kan gå ud og få sig en pizza.

Steen Lysgaard er 28 år og ph.d.-studerende i forskergruppen CASE på DTU. Her arbejder han med teoretiske beregninger af materialer, der kan producere, binde og frigive ammoniak. Lone Bech er Steens kollega og arbejder med eksperimentel fysik. Hun afprøver teoretikernes resultater i laboratoriet. Niflheim er DTU's supercomputer og var i 2010 Danmarks hurtigste.

Kan du arbejde som forsker?

For teoretiske forskere er modeller af kemiske forbindelser et vigtigt redskab. Forskerne bruger ofte avancerede computerprogrammer til at undersøge modellerne. Her kan forskerne for eksempel undersøge, hvordan enkelte atomer sætter sig sammen, og hvor meget molekylerne fylder, når de er bundet i et fast stof.

I skal nu selv bruge molekylemodeller til at undersøge, hvordan ammoniak kan pakkes i saltkrystallen magnesiumchlorid. Saltet består af et gitter af mange MgCl_2 -enheder. I kan forestille jer, at hver enhed er ligesom en kasse, der kan fyldes ammoniak i.

Forskere som Steen Lysgaard (modsatte side) arbejder netop på at under-

søge magnesiumchlorid ved hjælp af computermodeller. Typisk starter han med nogle få oplysninger. I takt med, at han får indsamlet flere oplysninger, forbedrer han sin model. Det svarer lidt til at finjustere en madopskrift ved hele tiden at smage sig frem. I stedet for at bruge computerskabte molekylemodeller, skal I bruge et molekylebyggesæt. Del klassen ind i grupper, som hver får et byggesæt og et bægerglas.

Fordelen ved at arbejde med modeller er naturligvis, at molekylerne er så store, at I kan se dem. Virkelighedens molekyler er ca. 250.000.000 gange mindre. Molekylernes størrelse måles i ångstrøm ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0,0000000001 \text{ m}$). Jeres modeller måles i cm.

I skal bruge:

500 ml bægerglas
Molekylebyggesæt



Målestoksforhold:

Når I måler rumlige figurer, skal I bruge cm^3 . I jeres model svarer 1 \AA^3 til 16 cm^3 . I skal også vide, at 1 cm^3 fylder 1 ml.

Oplysning 1: Saltet består af et gitter af MgCl_2 -enheder. En enhed kan rumme et vist antal NH_3 -molekyler.

- I kapitlets tekst kan du læse, hvor mange NH_3 -molekyler en MgCl_2 -enhed kan rumme. Find dette antal.
- Byg samme antal NH_3 -molekyler, og pak dem så tæt som muligt i et 500 ml bægerglas. Hæld vand i glasset, til molekylerne netop er dækket. Hold dem nede, så de ikke flyder ovenpå. Hvad er det samlede rumfang af vand og molekyler i ml (eller cm^3)?

Oplysning 2: Alle NH_3 -molekylerne i en enhed er bundet til det samme magnesiumatom.

- NH_3 -molekylerne binder til magnesiumatomet ved hjælp af en fjerde binding. Sæt en fjerde pind i jeres NH_3 -molekyler. Fordel molekylerne mellem jer, og hold dem, så molekylernes fjerde pind peger mod det samme punkt.
- Vurder, om molekylerne stadig kan være i et 500 ml bægerglas.
- Lad en person i gruppen bruge en lineal til at måle højde, bredde og dybde på de seks molekyler, mens I holder dem. Beregn, hvor mange cm^3 rumfanget af en enhed mindst skal være for at indeholde alle NH_3 -molekylerne.

Oplysning 3: Rumfanget af en enhed $\text{Mg}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_2$ er 330 \AA^3 .

- Omregn enhedens rumfang fra Å^3 til cm^3 .
- Hvor tæt på var jeres bud?

Oplysning 4: Rumfanget af en tom enhed MgCl_2 er 68 \AA^3 .

- Omregn enhedens rumfang fra Å^3 til cm^3 .
- Brug jeres resultater til at beskrive, hvordan saltgitteret ændrer sig, når det binder NH_3 -molekyler.

En revolutionerende opfindelse

Vedvarende energikilder som sol og vind spiller en vigtig rolle i fremtidens energiforsyning. Det kræver dog, at vi udnytter dem bedre. Forskerne skal for det første blive bedre til at omdanne vedvarende energi til kemisk energi. For det andet skal de lave brændstoffer, der både er praktiske at fremstille og opbevare. Endelig skal energien kunne trækkes ud af brændstoffet uden for store anstrengelser.

Ammoniak er et af de kemiske stoffer, som forskerne vil bruge som brændstof. Det frigiver nemlig store mængder energi, når det brændes af. Som du har læst i dette kapitel, er den nuværende metode til fremstilling af ammoniak dog alt for krævende. Hvis ammoniak skal bruges til at gemme eksempelvis overskydende strøm fra vindmøller, skal forskerne udvikle en ny metode. Her kigger de mod naturen, hvor bakterier i bælgplanter allerede laver ammoniak uden at bruge høje temperaturer og tryk. Når vi har brug for energi, for eksempel strøm eller brændstoffer, kan vi hente energien ud af ammoniak ved at brænde den af. Hvis vi indretter vores huse og biler til at bruge

ammoniakpiller i stedet for benzin eller naturgas, kan vi sænke udledningen af CO₂ og passe bedre på miljøet.

I dag laver man ammoniak ved Haber-Bosch-processen. Da den blev opfundet for godt 100 år siden, var der næppe nogen, der forudså, hvor revolutionerende processen ville være i forhold til brugen af kunstgødning og muligheden for at brødføde verdens befolkning. Haber-Bosch er nu en af vores vigtigste industrielle processer. Mange nationer er afhængige af kunstgødning for at kunne skaffe mad til deres hurtigt voksende befolkninger. Desværre er der en skæv fordeling af kunstgødning mellem de industrielle lande og udviklingslandene. En ny og mindre krævende metode til fremstilling af ammoniak kan afhjælpe nogle af problemerne. Billigere og mindre anlæg kan nemlig placeres mere lokalt og bruges i udviklingslandene, hvor der er stort behov for dem.

Opfindelsen af Haber-Bosch-processen ændrede i den grad verden. Vil du være med til at opfinde en ammoniakproces og ændre verden på ny?



Det ved du nu

- Ammoniak består af et nitrogenatom og tre hydrogenatomer.
- Ammoniak bruges primært til at lave kunstgødning. Det er det næstmest producerede stof i verden.
- Atmosfæren indeholder 78 % nitrogen i form af N_2 .
- Planter optager nitrogen fra jorden som nitrat og ammonium.
- Bakterier i bælgplanters rødder kan omdanne luftens nitrogen til ammoniak.
- Dyr og mennesker får nitrogen gennem føden.
- Nitrogenforbindelser som NO_3^- , NO og NO_2 kan forurene vandmiljøet og luften samt være sundhedsskadelige.
- Forskerne vil omdanne vedvarende energi til kemisk energi i ammoniak.
- Nye katalysatorer skal få ammoniakreaktionen til at ske ved normal temperatur og atmosfæretryk.
- Når ammoniak forbrændes, frigiver det meget energi, men ingen CO_2 .



Test dig selv

- * Tegn et ammoniakmolekyle.
- * Hvor kommer den nitrogen fra, som industrien bruger til at lave ammoniak?
- * Hvor kommer den hydrogen fra, som industrien bruger til at lave ammoniak?
- * Hvad skal din krop bruge nitrogen til?
- * Nævn nogle fordele og ulemper ved brug af kunstgødning.
- ** Opskriv og afstem den reaktion, der benyttes til industrielt at fremstille ammoniak.
- ** Hvordan udnytter ærteblomster nitrogen fra luften?
- ** Hvorfor siver nitrat lettere ned i jorden end ammonium?
- ** Hvad betyder det, at vedvarende energikilder er flygtige?
- ** Hvad bliver udstødningsrøg renses for, når det sendes gennem et ammoniakfilter?
- *** Forklar, hvad der sker i Haber-Bosch-processen.
- *** Hvorfor kræver det meget energi at bryde nitrogenbindingen?
- *** Hvordan kan en ny, mindre energikrævende metode komme fattige lande til gode?
- *** Hvorfor har vi brug for at kunne gemme vedvarende energi?
- *** Hvordan kan man transportere ammoniak sikkert rundt som brændstof?

