

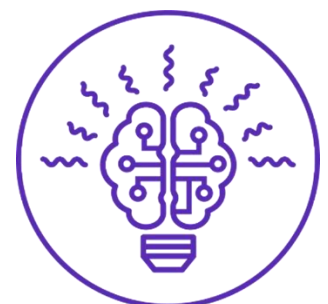
# MATERIALESAMLING

## POWER TO X

### INDHOLD

Modul 1: Intro til Power-to-X.....	2
Modul 2 og 3: Eksperiment med elektrolyse og energiberegninger.....	4
Modul 4: Kemiske stofgrupper og kemiske navne.....	16
Modul 5: Energi, effekt og energitæthed.....	25
Modul 6 og 7: Forberedelse af virksomhedsbesøg og slutopgave.....	28

Materialet er udviklet i 2021 af  
Bjørn Svenningsen, cand.scient. og gymnasielærer  
og DA Åben Virksomhed



## Modul 1: Intro til Power-to-X

Både i Danmark og internationalt er der stor fokus på at reducere CO<sub>2</sub>-udslippet til atmosfæren og derigennem bidrage til at nå de internationale klimamålsætninger samt mindske den menneskeskabte drivhuseffekt. Vi arbejder på at nedsætte forbruget af fossile brændstoffer (primært kul, olie og gas) og i stedet omlægge forbruget til vedvarende energiformer (kaldes også grøn energi).

Man kan f.eks. producere grøn energi ved hjælp af vindmøller eller solceller. Det er ikke altid, at solen skinner eller vinden blæser. Det er derfor smart at kunne lagre overskydende strøm, når der bliver produceret mere strøm, end der forbruges. Det kan man bl.a. gøre ved at omdanne grøn strøm til brint og andre brændstoffer, som både er lettere at lagre og transportere. Faktisk er der også en række sektorer, som transportsektoren og luft- og skibsfart, der ikke kan bruge strøm som brændstof, men er afhængige af flydende eller gasformige brændstoffer.

Konvertering af grøn strøm til brint og videre til andre grønne brændstoffer går under samlebetegnelsen *Power-to-X* (eller bare *PtX*) og er centralt for at nå i mål med den grønne omstilling. Det vil kræve store mængder grøn strøm og en udvikling af *Power-to-X*-teknologierne at erstatte fossile brændstoffer med grønne *Power-to-X*-brændstoffer. Luft- og skibsfart er sammen med den tunge industri nogle af de sektorer, hvor det er sværest at opnå CO<sub>2</sub>-reduktioner.

Igennem dette undervisningsforløb lærer du om nogle af de grundlæggende processer og teknologier, som man bruger for at udvikle grønne brændstoffer. Det er dyrt at producere de grønne brændstoffer i dag. Der er mange forskningsinstitutioner og virksomheder, der arbejder med at udvikle teknologierne, så vi kan udnytte den grønne energi endnu mere effektivt og producere billigere energi.

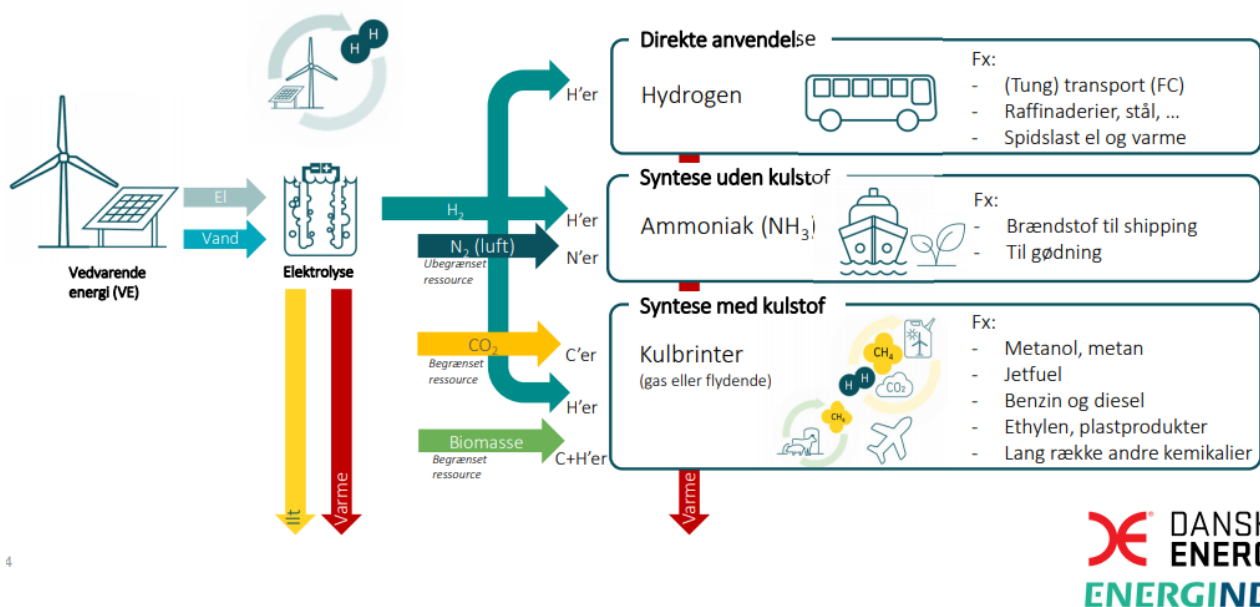
Som et led i undervisningsforløbet skal klassen på besøg i en virksomhed, der arbejder med at udvikle grønne brændstoffer. Her vil I få en forståelse for, hvordan virksomheden arbejder, og hvilke udfordringer de står overfor.

Diagrammet i figur 1 viser energiens vej fra vindmølle og solcelle til bruger. Det bedste er naturligvis, hvis man kan bruge den elektriske strøm direkte, for det giver mindst tab. Det kan man i rigtig mange tilfælde, men den tunge del af land- og søtransporten samt luftfarten vil nok være afhængig af transportable brændstoffer i en del år endnu. Man kan omdanne grøn strøm til hydrogen ved elektrolyse af vand.

Noget hydrogen kan benyttes direkte i den kemiske industri eller som brændstof, f.eks. i brintbiler. Men hydrogen er vanskelig at lagre og transportere i store mængder, så derfor vil man tit gå videre og omdanne hydrogen til forskellige andre energirige kemiske forbindelser, der er

nemmere at transportere. Det er som nævnt fremstillingen af energirige stoffer ud fra elektrisk strøm, som vi kalder Power-to-X. X'et står for de forskellige brændsler som f.eks. methanol, jetbrændstof eller ammoniak.

## Hvad er Power-to-X?



**Figur 1:** Overblik over Power-to-X (efter aftale med EnergiNet).

Materialet, som du skal arbejde med i dette undervisningsforløb, indeholder følgende hovedpunkter:

- Eksperimenter med elektrolyse med fokus på kemiske omdannelser, energiberegning og optimering af en industriel proces.
- Beskrivelse af forskellige energirige kemiske forbindelser og de egenskaber, som gør dem særligt velegnede til formålet. Desuden ser vi eksempler på systematisk kemisk navngivning.
- Eksempler på produktion.
- Forberedelse og efterbehandling af virksomhedsbesøget.

## Modul 2 og 3: Eksperiment med elektrolyse og energiberegninger

Der er et par begreber, som du skal have styr på inden disse lektioner. Du kan eventuelt nøjes med den kortfattede beskrivelse nedenfor:

- En endoterm reaktion forbruger varme.
- En exoterm reaktion frigiver varme.
- En katalysator er et stof, der forøger reaktionshastigheden uden selv at forbruges ved reaktionen.
- Nyttevirkning ved en proces er den brøkdelt af den tilførte energi, der omsættes til nyttig energi. Tallet kan angives som decimaltal eller procent, f.eks. 0,78 eller 78 pct.
- Elektrolyse er en måde at adskille et stof på ved hjælp af elektricitet.
- En oxidation er en afgivelse af elektroner, og en reduktion er en optagelse af elektroner. I de fleste reaktioner sker oxidation og reduktion samtidig i en redoxproces, men netop i elektrolyse sker de to adskilt, så der sker en reduktion (optagelse af elektroner) ved katoden og en oxidation (en afgivelse af elektroner) ved anoden. Anoden er dermed den positive pol og katoden den negative.

### Kemi A- og B-niveau, desuden:

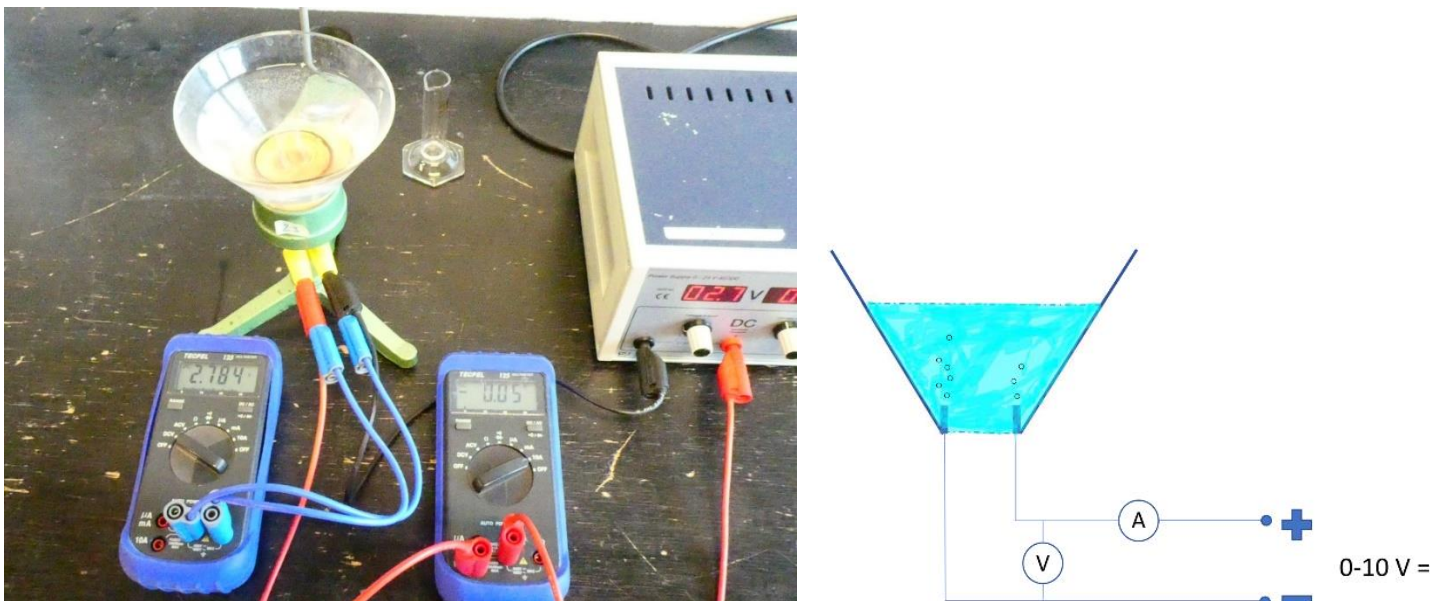
- *Le Chateliers princip*: Et ydre indgreb i en kemisk ligevægt forskyder ligevægten i den retning, der gør virkningen af indgrebet mindre. De aktuelle omstændigheder forklares i det følgende.
- Kendskab til begreberne *entalpi*, *entropi* og *Gibbs-energi* er forudsætning for at løse opgaverne 12 og 23.

Power-to-X-processen vil normalt starte med elektrolyse af vand, så vi bruger energien fra vindmøller og solceller til at skille vand i hydrogen og oxygen. Hydrogenet kan så anvendes direkte, eller det kan oparbejdes til andre energiholdige produkter.

Vi skal lave forsøg i laboratoriet med elektrolyse af vand, og samtidig sætte det i perspektiv til, hvilke udfordringer man møder, når man skal planlægge processen i stor industriel skala.

## Forsøg

Til forsøget i laboratoriet har du et elektrolysekar. Det er et lille kar med to platinelektroder i bunden. De to elektroder forbindes med en strømforsyning, der kan levere op til 10 volt jævnspænding. Der er indsat amperemeter og voltmeter i kredsløbet, så vi kan følge spændingen over elektroderne og strømstyrken ved elektrolysen. I elektrolysekarret hælder vi fortyndet svovlsyre ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Væsken i karret kalder vi en *elektrolyt*. Forsøget fungerer fint med en 0,1 M svovlsyre, og så kan man uden problemer røre ved væsken, hvis man skyller hånden bagefter.



**Figur 2:** Forsøgsopstilling med elektrolysekar af ældre dato – måske har dit gymnasie nyere udstyr, men det fungerer på samme måde.

### Indledende forsøg

Skrup langsomt op for spændingen. Bemærk, at der går en ganske lille strøm. Væsken er elektrisk ledende på grund af svovlsyren. Selv rent vand er lidt ledende på grund af vands autoprotolyse (autoprotolyse er det fænomen, at selv rent vand indeholder hydrogenioner og oxoniumioner). Amperemeteret skal eventuelt indstilles på et meget følsomt måleområde.

Hold øje med elektroderne, mens du skruper op for spændingen. Bemærk, at ved en vis spænding, som vi kan kalde *tærskelsspændingen*, begynder der at danne sig luftbobler på elektroderne, og elektrolysen er i gang. Foretag en første vurdering af, hvilken spænding der er nødvendig for at danne luftbobler og notér den:

Tærskelsspænding for elektrolyse (V) =

Bemærk også, at nu stiger strømstyrken. Hold øje med måleområdet på amperemeteret. Der skal sikkert skiftes til et mindre følsomt måleområde.

Skru yderligere op for spændingen. Luftudviklingen bliver kraftigere. Faktisk så kraftig, at det bliver muligt at måle den udviklede luftmængde ved at opsamle den i et reagensglas.

Noter, hvilken spænding der giver en passende livlig udvikling af luftarter. Du kan f.eks. sørge for, at strømstyrken er en halv til en hel ampere. Den spænding skal du anvende i det følgende forsøg. Den kan vi kalde *forsøgsspændingen*.

Forsøgsspændingen (V) =

Sluk hurtigt for spændingen. Det kan eventuelt gøres ved at trække ledningen ud af strøm-forsyningen.

Bemærk, at i nogle få sekunder opstår der en modsatrettet spænding. Voltmeteret viser en negativ værdi. Den negative spænding viser, at processen går den modsatte vej, altså at oxygen og hydrogen på elektroderne reagerer og danner vand, samtidig med at der produceres strøm. Det er det, der sker i en *brændselscelle*. Ideelt set skulle denne spænding være tærskelspændingen med modsat fortegn. Nogle industrielle elektrolyseceller kan fungere begge veje, så de også kan være brændselsceller.



**Figur 3:** Her tankes brint. Motoren i en brintbil er elektrisk. Elektriciteten leveres af brændselsceller, hvor hydrogen og oxygen reagerer og danner vand. Virksomheden Nel Hydrogen producerer og distribuerer bl.a. hydrogen i DanmarkFoto: Colourbox.com

I næste forsøg kan du måle, om væsken modtager energi. Det gør du ved at måle temperaturen i væsken før og efter elektrolyse samt volumen af væsken i elektrolysekarret.

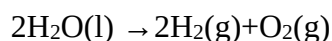
## Måling af udviklet hydrogen og oxygen

Fyld et reagensglas med elektrolyt, hold med en finger for reagensglassets munding, og sæt glasset med mundingen ned i elektrolysekarret, så mundingen er over den ene elektrode. Gør det samme med et glas over den anden elektrode, og spænd de to reagensglas fast (skitse af opstilling figur 4).

Vask hænder!

Vi vil foretage elektrolyse, til det ene reagensglas er fyldt. Vi skal måle spændingen og strømstyrken samt tiden, som elektrolysen varer. Du skal altså bruge et stopur. Desuden skal vi kende volumen af reagensglasset med hydrogen.

Reaktionen ved elektrolyse er:



Der dannes dobbelt så stort volumen hydrogen som oxygen.

### Forsøget

- Mål temperaturen i elektrolysekarret.
- Skru hurtigt op for spændingen til forsøgsspændingen, og start stopuret.
- Hold øje med spænding og strømstyrke. Hvis de varierer under forsøget, så vurder gennemsnittet.
- Hold øje med de to reagensglas, og stop forsøget, og aflæs tiden, når det ene glas er fyldt med hydrogen, og al væsken er fortrængt.
- Mål også temperaturen i elektrolysekarret.
- Notér, om det luftfyldte glas er ved den positive eller den negative elektrode.
- Tag det luftfyldte glas op, og sæt en tændstik til. Konstater, at luftarten er brændbar. Så er det nok hydrogen!
- Mål glassets volumen, f.eks. ved at måle, hvor meget vand der kan være i det.
- Med hensyn til oxygen, så vurder, om volumen af udviklet oxygen, er det halve af det udviklede hydrogen.

- Du kan eventuelt fortsætte elektrolysen, så det halvfylde glas bliver fyldt. Vend det om, og sæt en glødende træpind ned i glasset. Den vil flamme voldsomt op, fordi oxygen nærer forbrændingen.
- Mål til sidst massen af elektrolyt i karret og reagensglassene.

### Resultater for elektrolyseforsøget

- Strømstyrken under elektrolysen:  $I =$
- Spændingen under elektrolysen:  $U =$
- Tid for elektrolysen:  $t =$
- Volumen af udviklet hydrogen:  $V =$
- Ved hvilken pol udvikles mest luftart:
- Temperatur ved start:  $t_1 =$
- Temperatur ved slut:  $t_2 =$
- Massen af elektrolyt:  $m_v =$

### Energiberegninger

Hele ideen med at lave elektrolysen er at overføre energien fra den elektriske strøm til det udviklede hydrogen. Det ideelle ville være, hvis energien kunne overføres 100 pct. Sådan vil det ikke være i praksis – hverken i vores elektrolyseforsøg eller i et industrielt anlæg. Der vil altid være tab af energi, når man overgår fra en energiform til en anden, men man prøver at minimere det.

Vi kan se på energiregnskabet:

Først skal vi beregne den tilførte elektriske energi:

Effekten beregnes som strømstyrke gange spænding ( $P = I \cdot U$ ), og den samlede tilførte energi beregnes som effekt gange tid ( $E_{\text{tilført}} = P \cdot t$ ), så den samlede tilførte energi er strømstyrke gange spænding gange tid:

$$E_{\text{tilført}} = P \cdot t = I \cdot U \cdot t$$

Oplagret energi i hydrogen:



Hvis vi bruger hydrogen som brændstof, så vil vi interessere os for brændværdien af det udviklede hydrogen. Brændværdien pr. kg hydrogen kan findes ved tabelopslag, og vi kan beregne  $E_{\text{Hydrogen}}$ .

Målet er, at den størst mulige procentdel af den tilførte elektriske energi oplagres som energi i hydrogen.

### Eksempel på energiberegning og nogle overvejelser

Her er et eksempel på resultaterne af et forsøg. Udfør tilsvarende beregninger med jeres egne forsøgsresultater:

- Strømstyrken under elektrolysen:  $I = 0,86 \text{ A}$
- Spændingen under elektrolysen:  $U = 8,5 \text{ V}$
- Tid for elektrolysen:  $t = 3 \text{ min. } 5 \text{ sek.} = 185 \text{ s}$
- Volumen af udviklet hydrogen:  $V = 23 \text{ mL} = 0,023 \text{ L}$
- Tærskelsspændingen er målt til  $2,1 \text{ V}$
- Temperatur ved start:  $t_1 = 19,3^\circ \text{ C}$
- Temperatur ved slut:  $t_2 = 20,2^\circ \text{ C}$
- Massen af elektrolyt:  $m_v = 188 \text{ g} = 0,188 \text{ kg}$

Vi kan nu beregne følgende:

Den tilførte elektriske energi er  $E_{\text{tilført}} = 0,86 \text{ A} \cdot 8,5 \text{ V} \cdot 185 \text{ s} = \mathbf{1352 \text{ J}}$

Brændværdien (øvre brændværdi) for hydrogen er ifølge tabelopslag  $142,5 \text{ MJ/kg} = 142,5 \text{ kJ/g}$ , og densiteten for hydrogen er  $0,0899 \text{ g/L}$ .

Den oplagrede energi i vores hydrogen er dermed  $E_{\text{Hydrogen}} = 0,023 \text{ L} \cdot 0,0899 \text{ g/L} \cdot 142,5 \text{ kJ/g} = 0,295 \text{ kJ} = \mathbf{295 \text{ J}}$ .

Det var ikke så godt! Vi har tilført  $1352 \text{ J}$  og kun fået hydrogen svarende til  $295 \text{ J}$  ud af det. Det giver en *nyttevirkning* på ca.  $295 \text{ J}/1352 \text{ J} = 0,22$  svarende til  $22 \text{ pct.}$

Forklaringen ligger i forsøgsspændingen. Vi skruede godt op for spændingen for at få gang i processen. Hvis vi havde været mere tålmodige, så kunne vi have fremstillet den samme

mængde hydrogen ved tærskelspændingen, og så var regnskabet blevet et andet. Med en spænding på 2,1 V ville den tilførte elektriske energi være  $E_{\text{tilført}} = 0,86 \text{ A} \cdot 2,1 \text{ V} \cdot 185 \text{ s} = 334 \text{ J}$ , og nyttevirkningen ville være hele 88 pct.

Dette illustrerer et dilemma, som man tit står i, når man skal planlægge en industriel proces. Man vil gerne have, at reaktionerne er så effektive som muligt, men på den anden side må processen heller ikke være for langsom. De to hensyn må vejes op mod hinanden, så man både får en rimelig nyttevirkning og en rimelig høj produktionshastighed. Der er også noget andet, der skal ændres. I vores lille forsøg brugte vi platinelektroder. Det kan vi godt i et skoleforsøg, men hvis vi laver et stort industrielt anlæg, så er platin alt for dyrt.

Men hvad er der så blevet af den tabte energi i forsøget? Den er blevet til varme i elektrolysekarret. Hvis du har målt temperaturen i karret før og efter elektrolysen og har målt volumen af vand i karret, så kan du regne efter, om opvarmningen er i overensstemmelse med den tabte energi (formlen er kendt fra varmelæren).

$$E_{\text{varmetab}} = m_v \cdot c_v \cdot (t_2 - t_1) = 188 \text{ g} \cdot 4,2 \text{ J/g}^\circ\text{C} \cdot (20,2^\circ\text{C} - 19,3^\circ\text{C}) = 711 \text{ J}$$

Det forklarer det meste af den tabte energi. Når elektrolysen skal udføres i stor målestok, vil der være en masse overskudsvarme. Overskudsvarmen skal helst kunne bruges til noget fornuftigt – f.eks. fjernvarme til en by eller opvarmning af gartneri.

## Spørgsmål

### Opgave 1:

Brændværdien for hydrogen blev fundet ved tabelopslag som øvre brændværdi. Der findes også en nedre brændværdi. Hvad er forskellen?

### Opgave 2:

Svovlsyren i forsøget fungerer som katalysator for elektrolyseprocessen. Gør rede for, at svovlsyren opfylder kravene til en katalysator.

### Opgave 3:

Ved elektrolysen udvikles der også oxygen. Har du nogle forslag til, hvad dette oxygen kunne bruges til?

### Opgave 4:

Temperatur har stor betydning for kemiske reaktioners hastighed. Foreslå et forsøg, hvor man kan undersøge temperaturens betydning for elektrolyse. Udfør eventuelt forsøget.

### Opgave 5:

Tærskelspændingen for elektrolyse kan bestemmes bedre ved at tegne en graf over strømstyrken som funktion af spændingen ved elektrolyse. Tilrettelæg eventuelt sådan et forsøg.

### Opgave 6:

Find dagsprisen på platin.

### Opgave 7:

Elektrolyseprocessen i vores forsøg,  $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ , er endotherm. Når vi ved, at processen er endoterm, skal vi så tilstræbe at foretage elektrolysen ved høj eller lav temperatur?

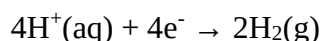
## Reaktioner ved de to elektroder

Ved elektrolyse sker oxidation og reduktion adskilt. Vi husker definitionerne:

*En oxidation er en afgivelse af elektroner*

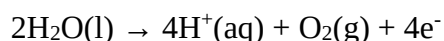
*En reduktion er en optagelse af elektroner*

Ved den negative elektrode (katoden) er der overskud af elektroner, og her er der noget i elektrolytten, der optager elektroner. De positive hydrogenioner kan optage elektroner i denne reaktion:

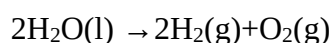


Hydrogenionerne reduceres hermed til hydrogen.

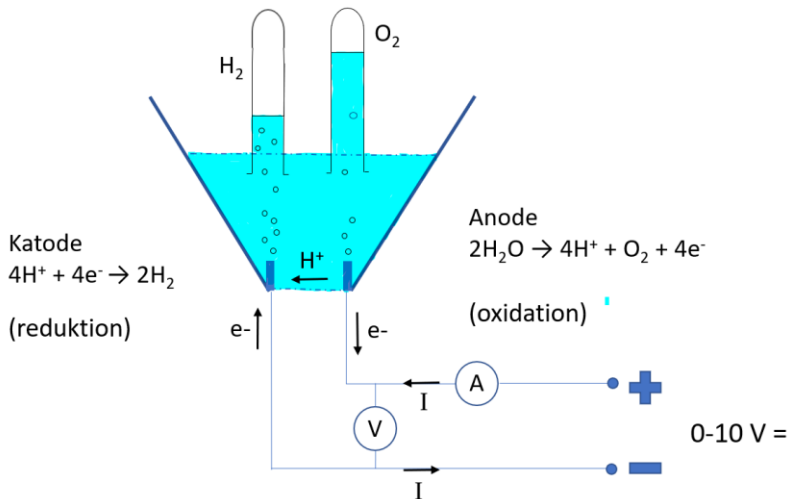
Ved den positive elektrode (anoden) er der underskud af elektroner, og her er der noget i elektrolytten, der tvinges til at afgive elektroner. Man kunne forestille sig, at det var de negative sulfationer  $\text{SO}_4^{2-}$ , der afgav elektroner, men disse ioner er meget holdbare, så i stedet afgives der elektroner fra vand, og der dannes hydrogenioner og oxygen.



Lægger man disse to reaktioner sammen, får man totalreaktionen:



Samtidig er der strømmet en ladning på fire elementarladninger rundt i kredsen.



**Figur 4** viser de processer, der foregår i kredsen.

- Den ydre strømforsyning tvinger elektroner væk fra anoden og over på katoden.
- Anoden skaffer sig hele tiden elektroner fra elektrolytten ved at oxidere vand.
- Katoden slipper af med elektroner ved at reducere hydrogenioner.
- Der går en elektrisk strøm i elektrolytten. Strømmen bæres af de positive hydrogenioner.
- Strømmen i ledningen bæres af elektroner. Da elektronerne er negative, bevæger de sig den modsatte vej af strømmen.

I industrien arbejdes der med forskellige typer af elektrolyseceller. I PEM (polymer elektrolyt membran) electrolyser bæres strømmen i cellen af hydrogenioner, som i det forsøg vi lige har lavet. I Atmospheric Alkaline Electrolyser bæres strømmen af hydroxidioner, og i SOEC (Solid Oxide Electrolyses Cell) bæres strømmen af oxygenioner.

## Spørgsmål

### Opgave 8:

Hvis vi i stedet for svovlsyre havde brugt en opløsning af kobbersulfat ( $\text{CuSO}_4$ ) som elektrolyt, så ville der være en anden ion end hydrogenionen, der kunne reduceres ved katoden. Hvilken?

### Opgave 9:

Hvis vi i stedet for svovlsyre havde brugt saltsyre (HCl) som elektrolyt, så havde vi fået en anden reaktion ved den positive elektrode, anoden. Hvilken? Og hvorfor bør dette forsøg med HCl foretages i stinkskab? Hvorfor kan vi i dette tilfælde ikke kalde saltsyren for en katalysator?

## Sammenhængen mellem energiomsætning og elektrolysespænding

(Dette afsnit er fortrinsvis for elever med kemi på B- eller A-niveau)

Vi så i omtalen af elektrolysen, at for hver af reaktionerne  $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$  overføres der 4 elektroner. Det betyder, at for hvert mol af reaktionen overføres der 4 mol elektroner i elektrolysen. Den samlede ladning, der overføres, er således ladningen af 4 mol elektroner.

En elektrons ladning er ”minus elementarladningen”, og ladningen svarende til 1 mol elementarladninger har et særligt navn, nemlig *Faradays konstant*  $F_c$ . Faradays konstant er således lig med Avogadros konstant gange elementarladningen.

$$F_c = N_A \cdot q_e = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 96500 \text{ C/mol}$$

Når vi skal regne på elektrolyse, så får vi brug for Faradays konstant og et par definitioner fra ellæren:

- Elektrisk strøm = passeret ladning pr tidsenhed.  $I = q/t$ . Dermed er  $q = I \cdot t$
- Elektrisk spænding er energi pr ladning.  $U = E/q$  og dermed  $E = U \cdot q$

### Eksempel på beregninger

I elektrolyseforsøget ovenfor er den omsatte ladning lig med  $q \cdot t = 0,86 \text{ A} \cdot 185 \text{ s} = 159,1 \text{ C}$ .

Den omsatte energi ved en spænding på 8,5 V er  $159,1 \text{ C} \cdot 8,5 \text{ V} = 1352 \text{ J}$ . Det fandt vi også ovenfor, men her ser vi tydeligt, at energien til elektrolysen er proportional med spændingen.

Vi kan også regne på stofmængder: Vi finder antal mol af reaktionen  $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$  ved at dividere den omsatte ladning med de  $4F_c$ , der kræves for et mol reaktioner.

Antal  $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$  reaktioner:  $n = q/4F_c = 159,1 \text{ C} / (4 \cdot 96500 \text{ C/mol}) = 0,0004122 \text{ mol}$ .

Der dannes 2 hydrogenmolekyler i hver reaktion, så vi får udviklet  $2 \cdot 0,0004122 \text{ mol} = 0,000824 \text{ mol H}_2$ .

Volumen af 1 mol af en gas ved stuetemperatur og normalt tryk er ca. 24 liter. Volumet af den udviklede mængde hydrogen er dermed  $0,000824 \text{ mol} \cdot 24 \text{ L/mol} = 0,0198 \text{ L} = 19,8 \text{ mL}$ .

Det stemmer nogenlunde med de 23 mL, som vi målte i forsøget.

## Opgaver

### Opgave 10:

Udfør de tilsvarende beregninger med dine egne forsøgsresultater.

### Opgave 11:

I denne opgave skal vi give et bud på tærskelspændingen ud fra brændværdien af hydrogen. Ideen er, at elektrolyse ved tærskelspændingen lige netop leverer energi nok til at få reaktionen  $2\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 2\text{H}_2\text{(g)} + \text{O}_2\text{(g)}$  til at gå fra venstre mod højre, og *brændværdien* er den energi, der frigøres, når reaktionen går fra højre mod venstre.

Ved tabelopslag skal du benytte øvre brændværdi. Øvre brændværdi er den brændværdi, som man får, når det dannede vand ved reaktionen ender som væske. Nedre brændværdi får man, når vandet ender som gas.

Benyt øvre brændværdi for hydrogen og regn på 1 kg hydrogen:

- Angiv øvre brændværdi for 1 kg hydrogen.
- Beregn stofmængden af  $\text{H}_2$  for 1 kg hydrogen.
- Hvor mange reaktioner (målt i mol):  $2\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 2\text{H}_2\text{(g)} + \text{O}_2\text{(g)}$  skal forløbe for at skaffe 1 kg hydrogen? Bemærk, at der dannes 2 mol  $\text{H}_2$  for hvert mol reaktioner. Antallet af reaktioner kalder vi  $n_{\text{reaktioner}}$ , hvor dette tal er målt i mol.
- Nu kan den forventede tærskelspænding,  $U$ , findes ved at sætte brændværdien lig med  $E = U \cdot q = U \cdot n_{\text{reaktion}} \cdot 4 \cdot F_c$
- Vurder denne spænding i forhold til dit forsøg. Sammenlign også med den modsatte spænding, som du så et kort øjeblik, da elektrolysen blev afbrudt. Kommenter!
- Når du tænker på forsøget, hvorfor er det så netop øvre brændværdi, som vi skal bruge?

(Bemærk, ovenstående giver ikke den helt nøjagtige værdi for tærskelspændingen, fordi spændingen ikke kun bestemmes af ændringen i entalpi. Den korrekte værdi bestemmes ved hjælp af Gibbs-energi, som nogle af jer har hørt om)

### Opgave 12 (Kemi A):

I stedet for brændværdien kan vi benytte faldet i Gibbs-energien svarende til reaktionen  $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ :

- Beregn faldet i Gibbs-energi svarende til reaktionen  $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ , og benyt resultatet til at beregne tærskelspændingen i laboratorieforsøget ved at sætte  $-\Delta G = z \cdot F_c \cdot U$ , hvor  $z$  er antallet af overførte elektroner i den aktuelle reaktion. I dette tilfælde er  $z=4$ .

## Modul 4: Kemiske stofgrupper og kemiske navne

Vi skal nu se lidt nærmere på, hvordan stofferne kan klassificeres og navngives.

Forudsætninger:

- Kendskab til grundstoffer og grundstoffernes periodesystem.
- Oktetreglen, covalente bindinger og grundstoffets valens.
- Grundstoffernes elektronegativitet, polære og ikke-polære bindinger.
- Molekylformel, strukturformel og molekylmodeller.

Ud fra dette skal vi se på de molekyler, der indgår i de stoffer, som vi mødte i første lektion. Vi skal se på følgende molekyler:

- Rent hydrogen, oxygen og carbon
- Forbindelser af carbon og hydrogen
- Forbindelser af carbon, hydrogen og oxygen
- Ammoniak

Hydrogen:  $H_2$      $H-H$



Hydrogen er det første grundstof i det periodiske system. Det har således kun én elektron og dermed én elektron i valensskallen, altså i den yderste skal, og hydrogen står i første hovedgruppe. Det kan dermed danne én covalent binding, og hydrogenmolekylet består af to hydrogenatomer, der er bundet sammen med én covalent binding.

Da hydrogenmolekylet er så let og ikke polært, så er hydrogen en gas, som er meget vanskelig at bringe på væskeform. Hydrogen fylder altså meget, eller den skal opbevares i trykflasker med meget højt tryk. Det sidste kan faktisk lade sig gøre med beholdere af forstærket carbon-fibre.



### Opgave 13:

Hydrogenbeholderen i en brintbil har volumen 125 liter, og der tankes brint/hydrogen til et tryk på 700 atmosfære. Beregn stofmængden af hydrogen i beholderen og massen af hydrogen.

Oxygen:  $O_2$        $O=O$



Oxygen er grundstof nr. 8, og det står i 6. hovedgruppe. Oxygen kan opfylde oktetreglen ved at danne to covalente bindinger. Som udgangspunkt er der en vinkel mellem de to bindinger, så der er gode muligheder for, at forbindelser med oxygen er polære.

Forbrændinger kan forklares således: Der er dobbeltbinding mellem de to oxygenatomer, men bindingerne er forholdsvis svage, og hvis disse bindinger brydes, og oxygen binder sig til noget andet, f.eks. carbon eller hydrogen, så vil de nye bindinger blive stærkere. Når vi således går fra svage bindinger til stærke bindinger, så bliver der frigjort energi, som vi kender det ved en forbrænding. Det er faktisk oxygenen, der leverer energien ved forbrænding. Det tænker vi ikke så meget på, for der er så rigeligt af den. Det har de grønne alger og planter sørget for.

Carbon:  $C$        $\begin{array}{c} | \\ -C- \\ | \end{array}$



Carbon er grundstof nr. 6, og det står i 4. hovedgruppe. Carbon kan opfylde oktetreglen ved at danne 4 covalente bindinger. Bindingerne er fordelt bedst muligt i rummet. Strukturformler med carbon antyder, at der til en given binding er en binding overfor og to ved siden af. Men i 3D ser man, at alle 4 bindinger er lige meget naboer.

Men 4 bindinger kan 2 carbonatomer ikke bindes sammen til et molekyle. Hvis hvert carbonatom bindes til 4 andre carbonatomer i et stort gitter, så har vi diamant. Det meste carbon, som man møder, er dog opbygget som nogle mere komplekse strukturer, der bl.a. indeholder sekslede ringe.

Carbon har den egenskab, at bindinger mellem carbonatomer er stabile. Her indtager carbonatomet en helt særlig rolle. Der er ikke andre grundstoffer, der kan danne lange kæder og forgrenede strukturer som carbon. Vi skal se nogle af dem.

### Forbindelser af carbon og oxygen

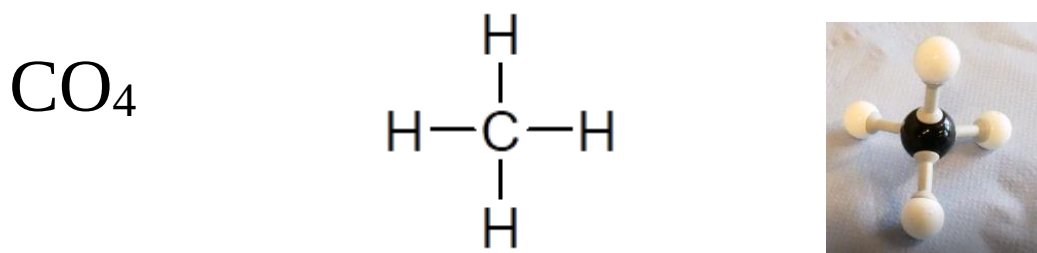
Den simpleste forbindelse af carbon og oxygen er *kuldioxid*. Kuldioxid består af ét carbonatom, der er bundet til 2 oxygenatomer.



De 3 atomer sidder på række, molekylet er ikke vinklet, og derfor er CO<sub>2</sub> en luftart, men ved et moderat overtryk som i en brandslukker bliver det til en væske. Det er derfor ret nemt at transportere, og hvis man lagrer det i undergrunden, f.eks. i gamle gas- og oliefelter, så lagres det som væske. Lagring af CO<sub>2</sub> kan være en hurtig måde at nedbringe CO<sub>2</sub>-udslip. At bruge CO<sub>2</sub> til PtX er mere langsommelig, men nok en mere holdbar løsning på længere sigt. Der er bl.a. store planer om CO<sub>2</sub>-fangst i affaldsenergianlægget Amager Bakke (ARC) i København.

### Forbindelser af carbon og hydrogen

Den simpleste forbindelse af carbon og hydrogen er *methan*. Methan består af 1 carbonatom, der er bundet til 4 hydrogenatomer.



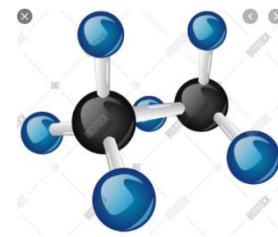
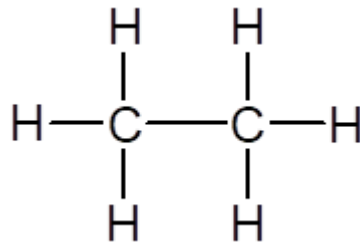
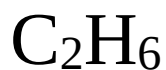
Molekylet er let, og på grund af den rumlige fordeling af hydrogenatomerne er det ikke polært. Det er derfor en gas ved stuetemperatur, og det kræver højt tryk eller lav temperatur at bringe det på flydende form.

Naturgas består i overvejende grad af methan. Det er et glimrende brændstof undtagen til transport, fordi det fylder så meget. Det er klimabelastende, men ikke helt så meget som olie og kul, fordi det indeholder så meget hydrogen. Methan kan fremstilles klimavenligt som bestanddel af biogas, og det kan fremstilles ved Power-to-X ud fra CO<sub>2</sub>.



**Figur 5:** Det er en god ide at se på en fysisk model af methan for at fornemme den rumlige opbygning. Når man tegner stukturformlen for methan på et stykke papir, så ser det ud, som om hydrogenatomerne kan sidde ved siden af hinanden eller over for hinanden, men den rumlige model viser, at alle 4 hydrogenatomer er lige meget naboer. Rød er lige tæt på gul, grøn og blå.

Naturgas indeholder også *ethan*:



(3D-model Free Images – SnappyGoat.com)

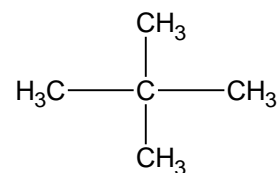
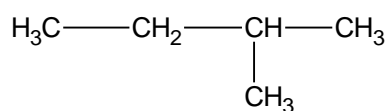
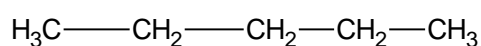
Ethan består af 2 carbonatomer, der er bundet sammen med 1 covalent binding. På de 6 ledige bindinger er der hydrogen.

Nu nærmer vi os en systematisk kemisk navngivning. Navnene methan og ethan ender begge på -an. Det er de to første *alkaner*. Alkaner består af et carbonskelet, der er opbygget med enkeltbindinger mellem carbon, hvor alle de ledige bindinger går til hydrogen.

Her er en oversigt over de 12 første alkaner:

Navn	Molekylformel	Antal C: n	Antal isome- rer	Kogepunkt (1 atm)
Methan	CH <sub>4</sub>	1	1	-161,5 °C
Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2	1	-88,6 °C
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3	1	-42,1 °C
Butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	4	2	-0,5 °C
Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	5	3	36,1 °C
Hexan	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6	5	68,7 °C
Heptan	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	7	9	98,4 °C
Octan	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	8	18	125,7 °C
Nonan	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	9	35	150,8 °C
Decan	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	10	75	174,1 °C
Undecan	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	11	159	195,9 °C
Dodecan	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	12	355	216,3 °C

Fra og med butan med 4 carbonatomer findes der *isomere* forbindelser, altså forbindelser hvor de samme atomer er sammensat på en anden måde til et nyt molekyle. De 3 isomerer af pentan er opbygget således:



#### Opgave 14:

Tæl efter, at de 3 isomerer af pentan har samme molekylformel.

#### Opgave 15:

Tegn de 5 mulige isomerer af hexan.

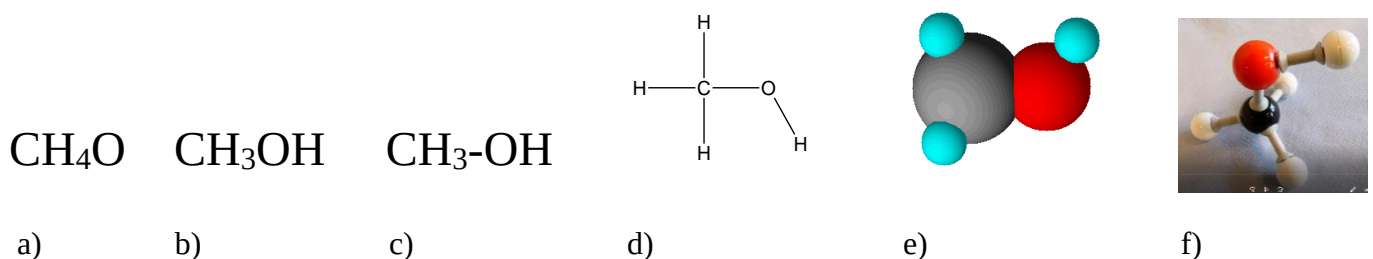
Hvis vi ser på mulighederne for at opbevare og transportere alkaner som brændstoffer, så skal vi op over 5 carbonatomer for at få alkaner, der er flydende ved stuetemperatur. Benzin består af alkaner med 7-9 carbonatomer i blanding med mange andre carbonhydrider (forbindelser af carbon og hydrogen). Dieselolie er et blandingsprodukt med højere kogepunkt og 12 carbonatomer eller mere. Propan og butan kan holdes flydende ved et moderat overtryk som flaskegas eller i engangslightere.

Det er altså forholdsvis store alkaner, der skal til for at skaffe et flydende brændstof. Men man kan gå en anden vej for at skaffe flydende brændstof, nemlig at gøre små molekyler mere polære.

## Forbindelser af carbon, hydrogen og oxygen

I stedet for at lave store alkaner kan man skaffe sig transportvenlig flydende brændsel ved at indføre et oxygenatom i små molekyler. Oxygen vil gøre molekylet polært og derved sænke kogepunktet.

Den simpleste forbindelse mellem de tre grundstoffer er methanol:



Stoffet methanol kan præsenteres på mange måder, som vist i figurene herover.

a) kaldes **molekylformlen**. Molekylformlen angiver, hvilke og hvor mange atomer der er i molekylet, men ikke hvordan molekylet er opbygget.

b),c) og d) er **strukturformler** af forskellig detaljeringsgrad, hvor d) har den fordel, at man ser vinklen ved oxygenatomet. Det er denne vinkel, der er årsag til, at molekylet er polært.

I e) er molekylet tegnet rumligt i et tegneprogram.

Figur f) er et fotografi af en molekylmodel i plastic. Man får en god fornemmelse af stoffets opbygning ved at sidde med sådan en i hånden. Bl.a. er det tydeligt, at de tre hydrogenatomer på kulstof er ligeberettigede.

Tegningerne d) og e) er lavet i programmet ChemSketch (freeware-version). Man kan f.eks. finde en introduktion til programmet på [https://www.youtube.com/watch?v=mP3xQ\\_I1\\_dg](https://www.youtube.com/watch?v=mP3xQ_I1_dg)

Molekylet er skævt ved oxygen, og oxygen tiltrækker elektroner mere end de to andre grundstoffer, så molekylet er polært, og det har derfor et meget højere kogepunkt end methan, så det er et flydende brændsel.



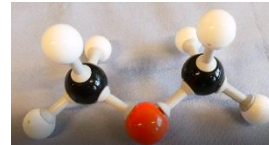
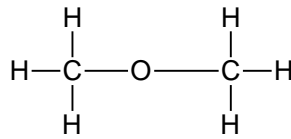
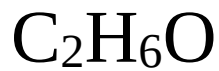
**Figur 6:** GreenLabs PtX-anlæg i Skive skal producere hydrogen og methanol ud fra vindmøllestrøm. Det er opført i samarbejde med energiparkens partnere Green Hydrogen System, ReIntegrate, Everfuel og Euro Wind. Foto: GreenLab Skive.

Navnet methanol er i familie med methan, men det ender på -ol. Vi får methanol ved at erstatte et af hydrogenatomerne i methan med en -OH-gruppe. Ligeledes får vi ethanol ved at erstatte et hydrogen i ethan med -OH. Stoffer med navne, der ender på -ol, kaldes alkoholer.

Denne måde at navngive på giver kun mening, fordi der er en række fælles kemiske egenskaber, som er knyttet til alkoholerne. -OH-gruppen er et eksempel på *en karakteristisk gruppe/funktionel gruppe*. Stoffer, der indeholder en bestemt funktionel gruppe, har nogle karakteristiske kemiske egenskaber, og de udgør en *stofklasse* i den organiske kemi. F.eks. er ”alkoholer” en stofklasse.

Der findes en del stofklasser i den organiske kemi. I denne omgang nøjes vi dog med at se på én stofklasse udover alkaner og alkoholer, nemlig ethere.

Den simpleste er *dimethylether*. Det er et muligt fremtidigt brændstof til skibe.

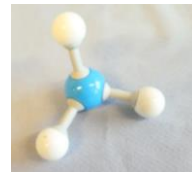
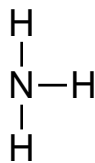


Etheren består af et oxygenatom i midten. Hver af de to bindinger fra oxygen går til en *methyl-gruppe*. Her er endnu et eksempel på navngivning. Den gruppe, som man får, hvis man fjerner et hydrogenatom fra methan, kaldes methylgruppen. Hvis man fjerner et hydrogen fra ethan, får man ethylgruppen. På tilsvarende måde kunne man også lave diethylether eller ethylmethylether. De grupper, som man får ved at fjerne et hydrogen fra en alkan, kaldes en *alkylgruppe*.

### Opgave 16:

Tegn strukturformlen for ethylmethylether.

### Ammoniak:



**Figur 7:** Europas største Power-to-X-anlæg skal bygges i Esbjerg og skal fremstille ammoniak. Ammoniak er en gammelkendt handelsvare, bl.a. som gødning i landbruget. Det betyder, at man har styr på

håndtering, distribution, og man har kunder til produktet, og det gør det nemmere at gå i gang med de nye muligheder, nemlig at anvende ammoniak som brændstof i skibe. Anlægget bygges af A. P. Møller – Mærsk, DFDS, Arla, Danish Crown og DLG i samarbejde med energi-investeringselskabet Copenhagen Infrastructure Partners og forventes færdigt i 2026.

Foto: Colourbox.com

At ammoniak faktisk kan bruges som brændstof, kan vi se ved følgende lille forsøg (fra Haagen & Parbo, Systeime, Kemiske demonstrationsforsøg, 1982):

### Katalytisk forbrænding af ammoniak

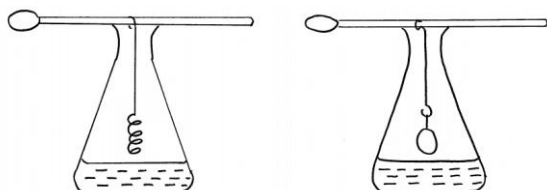
Materialer: 2 koniske glaskolber (å 250 ml)  
Måleglas (100 ml)  
Kobberspiral  
Platinring  
2 små spatler  
Koncentreret NH<sub>3</sub>

#### Forsøg:

Ca. 100 ml NH<sub>3</sub> overføres til en konisk kolbe.

Kobberspiralen opvarmes til rødglødende, hvorefter den hurtigt anbringes i kolben ophængt i en spatel på tværs af munden, så spiralen befinder sig umiddelbart over væskeoverfladen. Kobberspiralen fortsætter med at gløde i længere tid.

Forsøget gentages, idet kobberspiralen erstattes med platinringen. Platinringen holder sig glødende i meget lang tid.



#### Teori:

Følgende exoterme reaktion katalyseres af Cu og Pt:  $4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$

Forsøget illustrerer heterogen katalyse.



## Modul 5: Energi, effekt og energitæthed

### Enheder for energi og effekt

Den grundlæggende enhed for energi er joule (J) og symbolet for energi er  $E$ .

Enheden J er en ret lille enhed, og da vi samtidigt skal arbejde med store energimængder, så vil vi få brug for at angive store talstørrelser. Det klarer man med præfikser.

Værdi	Præfix	Symbol
$10^3$	kilo	k
$10^6$	mega	M
$10^9$	giga	G
$10^{12}$	tera	T
$10^{15}$	peta	P

#### Opgave 17:

Danmarks samlede forbrug af elektrisk energi i 2017 var 160 PJ. Hvor meget var det elektriske energiforbrug i gennemsnit pr. indbygger?

Effekt hænger sammen med energi på den måde, at effekten er omsat energi pr. tidsenhed. Symbolet for effekt er  $P$  (power). Effekt måles i W (watt), hvor  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ .

Den omsatte energi bliver så effekten gange tiden:

$$P = E/t \quad \text{og dermed} \quad E = P \cdot t$$

#### Opgave 18:

Power-to-X-anlægget i Esbjerg kan arbejde med en effekt på 1 GW. Beregn den omsatte energi på et år, hvis anlægget kører i 40 pct. af tiden.

Når vi til privat brug køber elektrisk energi, så afregner vi gerne for energien målt i kWh (kilowatttimer). Det er en praktisk enhed, der svarer til, at vi har en effekt på 1 kW (f.eks. en varmeovn) tændt i en time. I privat husholdning koster 1 kWh i 2020 ca. 2 kr., hvoraf det meste er afgifter.

$$1 \text{ kWh} = 1000\text{W} \cdot 3600\text{s} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

### Opgave 19:

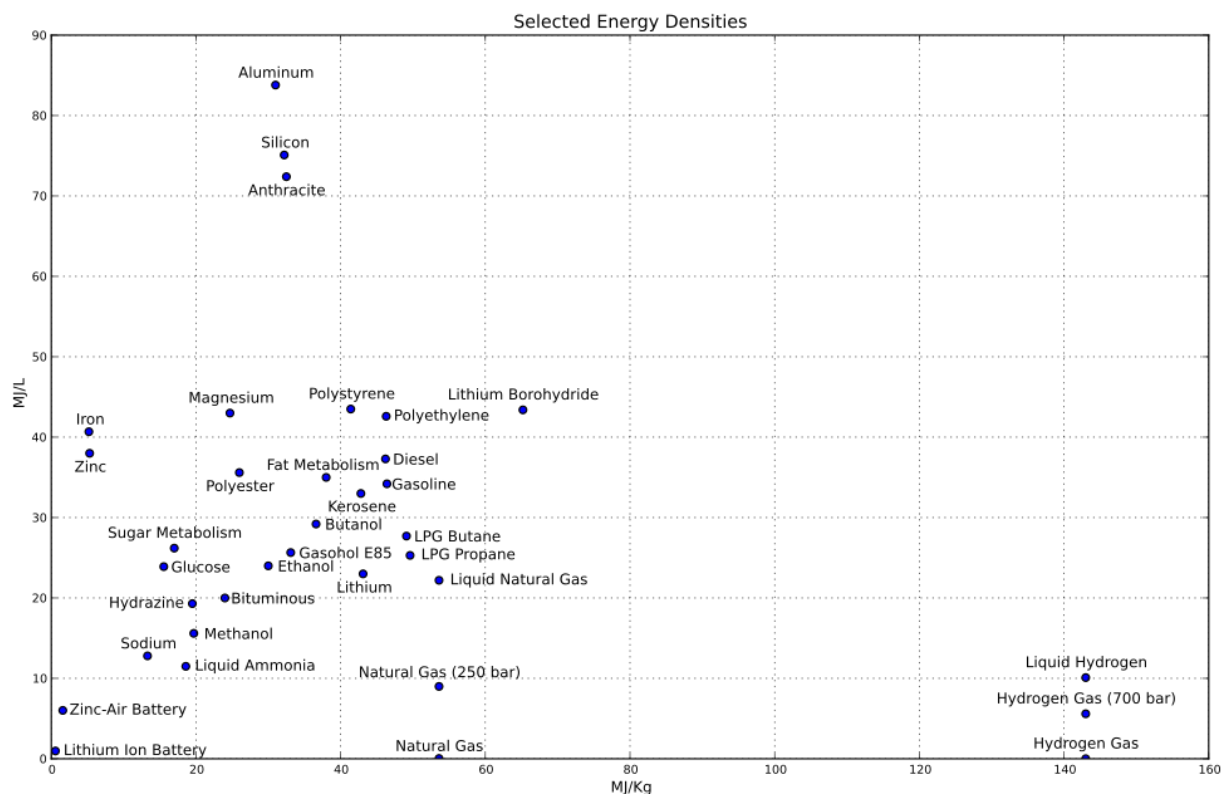
Varmelegemet i et akvarium er på 150 W, og det er tændt ca. 40 pct. af tiden. Beregn elforbrug og pris på et år.

### Opgave 20:

En vindmølle har den maksimale effekt på 2 MW. Det blæser ikke hele tiden, så den årlige ydelse er 30 pct. af det den ville være, hvis vinden altid var optimal. Beregn møllens samlede årlige produktion i en passende enhed.

## Energitæthed

Diagrammet nedenfor er fra et opslag i Wikipedia om energitæthed:



### Opgave 21:

- Hvor meget energi er der i 1 liter ethanol og i 1 kg ethanol. Hvorfor er de to tal ikke lige store?

- Overvej enheden på de to akser. Efter hvilket kriterium er naturgas (Natural Gas) ved 250 bar lidt bedre end benzin (Gasoline), og efter hvilket kriterium er det meget ringere?
- Methanol ser ud til at være ringere end benzin efter begge kriterier. Hvorfor kan man alligevel overveje at bruge det som brændstof i transportmidler?

### Opgave 22:

En brintbil tankes med brint/hydrogen. Tankens indre rumfang er 125 liter, og trykket er 700 atmosfærer.

- Beregn indholdet af hydrogen i tanken i mol og i kg.
- Beregn den samlede brændværdi af hydrogenet.
- Tankens ydre rumfang er 160 L, og den tomme tank vejer 30 kg.
- Afsæt hydrogen i tank, i diagrammet ovenfor.

### Opgave 23:

(De to første spørgsmål er til Kemi B/A, det sidste kun til Kemi A)

I virksomheden Haldor Topsøes elektrolyseværk benyttes SOEC-metoden. Her foregår elektrolysen ved 700 grader, så vandet er på dampform. Elektrolyseprocessen i dette tilfælde er  $2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ .

- Brug Le Chateliers princip til at argumentere for, om det er hensigtsmæssigt at anvende højt eller lavt tryk under processen.
- Kan der være andre argumenter for at lade elektrolysen forløbe ved højt eller lavt tryk?
- I elektrolyseanlægget foregår reaktionen ved 700°C, så udgangsstoffet er vand på dampform. Beregn  $\Delta G$  for denne reaktion  $2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ , og vurder tærskelværdien for elektrolysespændingen under disse forhold. Benyt at  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ .

Man kan undre sig over, at det er muligt at lave elektrolyse ved en så lav spænding, at den tilførte energi er mindre end væksten i entalpi. Grunden er, at væksten i entropi til en vis grad driver processen, idet 2 molekyler bliver til 3. Den manglende energi må så tilføres som varme fra omgivelserne.

## Modul 6 og 7: Forberedelse af virksomhedsbesøg og slutopgave

### Forberedelse af virksomhedsbesøg og slutopgave

I skal sætte jer ind i den virksomhed, som I skal besøge, ved hjælp af virksomhedens hjemmeside. Prøv at finde ud af:

- Hvad laver virksomheden?
- Hvilke kemiske reaktioner arbejder de med?
- Hvilke råprodukter anvender de?
- Hvad sælger de videre og til hvem (og hvis ikke de er nået så langt endnu, hvad er planen)?
- Er der biprodukter, der også kan sælges?
- Hvordan er produktionsprocessen? (f.eks. temperatur, tryk, koncentration, katalysatorer, effekt, nyttevirkning, eller hvad der nu er relevant).
- Hvor kan virksomheden placeres i figur 1 i introafsnittet i materialesamlingen?

Efter virksomhedsbesøget skal I gruppevis arbejde med en slutopgave om Power-to-X. Tal med jeres lærer om, hvilken slutopgave I kunne tænke jer at lave, og hvad der giver mening i forhold til netop den virksomhed, som I skal besøge. Slutopgaven kan afleveres enten som en artikel/en videofilm, eller hvad I aftaler med læreren.

Som forberedelse til virksomhedsbesøget skal I prøve at finde den information, som I skal bruge til slutopgaven. Den information, som I ikke kan finde på forhånd, må I forberede som spørgsmål til virksomhedsbesøget, så I er rustet til at løse opgaven, når I kommer tilbage på gymnasiet.

Her er forskellige forslag til en slutopgave:

- Beskriv, hvad virksomheden laver, og hvor de arbejder i PtX-værdikæden.
- Kortlæg, hvad der er af spild af stoffer og energi i de processer, der sker på virksomheden, og foreslå, hvad man kunne gøre for at udnytte ressourcerne endnu bedre.
- Hvis vi forestiller os, at I kunne flytte virksomheden til en anden valgfri geografisk beliggenhed, hvor ville man så kunne udnytte restprodukterne endnu bedre? (f.eks. i nærheden af en storby for let at kunne bruge overskudsvarmen, bruge ilten til at optimere forbrænding af affald eller lignende). I kan også argumentere for, at virksomheden har en god placering – af de samme grunde.

- Hvis I selv har andre ideer til en slutopgave, som I synes kunne være interessant, så tal med jeres lærer om det, og aftal, hvad I arbejder videre med.

Da fokus i dette virksomhedsbesøg er på kemi, forventes det, at en eller flere kemiske reaktioner er beskrevet godt i forbindelse med slutopgaven. Her kan f.eks. indgå reaktionsskema og begreber som reaktionshastighed, Le Chateliers princip, entalpi, entropi og Gibbs energi, udbytte pct., katalysatorer, principper for oprensning og krav til renhed.