

I LMFK-bladet 1/2025 blev et nyt energisystem beskrevet, der kan levere alt, hvad et moderne samfund behøver, uden at det forudsætter afbrænding af fossile brændsler. Her følger vi op med den første af et par artikler om nogle af de teknologier, som indgår i det nye energisystem. Brint er en af de vigtigste af disse teknologier.

Det nye energisystem er baseret på tre grundlæggende ressourcer: vind, sol og biomasse. Den primære konvertering af vind og sol til elektricitet sker med vindkraft og solenergi, og konvertering af biomasse til brugbare energiformer sker med biogas og pyrolyse.

Der er tre sekundære teknologier til konvertering af produkterne fra den primære konvertering, nemlig brint, ammoniak og metanol. Her er det brint, som i diagrammet står før de to andre sekundære teknologier. Årsagen er naturligvis, at der i både ammoniaksyntese og metanolsyntese indgår brint.

Øverst i hierarkiet har vi elektricitet. Der gælder den fundamentale regel, at alt, hvad der kan elektrificeres, skal elektrificeres. Elektrificering er den simpleste,

mest effektive og billigste måde at bruge vedvarende energi på. Vi skal over på elektrisk transport, hvor det er muligt, vi skal i størst muligt omfang have industrien over på el, varme skal i det omfang, det ikke leveres i form af spildvarme fra industrielle processer, produceres med varmepumper eller elpatroner, osv.

Selvom den foretrukne energiform er elektricitet, er der stadig store dele af samfundet, som ikke umiddelbart kan elektrificeres. Det gælder navnlig dele af transportsektoren, højtemperaturprocesser i industrien m.v. Her må vi så ty til andre midler.

Hvis man skal gå fra grøn strøm til andre produkter end el og varme, er der kun én vej: produktion af brint ved elektrolyse. Brint er den eneste vektor fra grøn strøm til andre produkter.

Figur 1 viser næste skridt i hierarkiet: konvertering af el fra vedvarende energikilder til grøn brint.

Grøn brint er naturligvis ikke en energikilde i sig selv, men en energibærer. Man kan tænke på brint som en teknologi, der gør det muligt at transportere og anvende

grøn strøm i sektorer, hvor direkte elektrificering ikke er mulig eller praktisk.

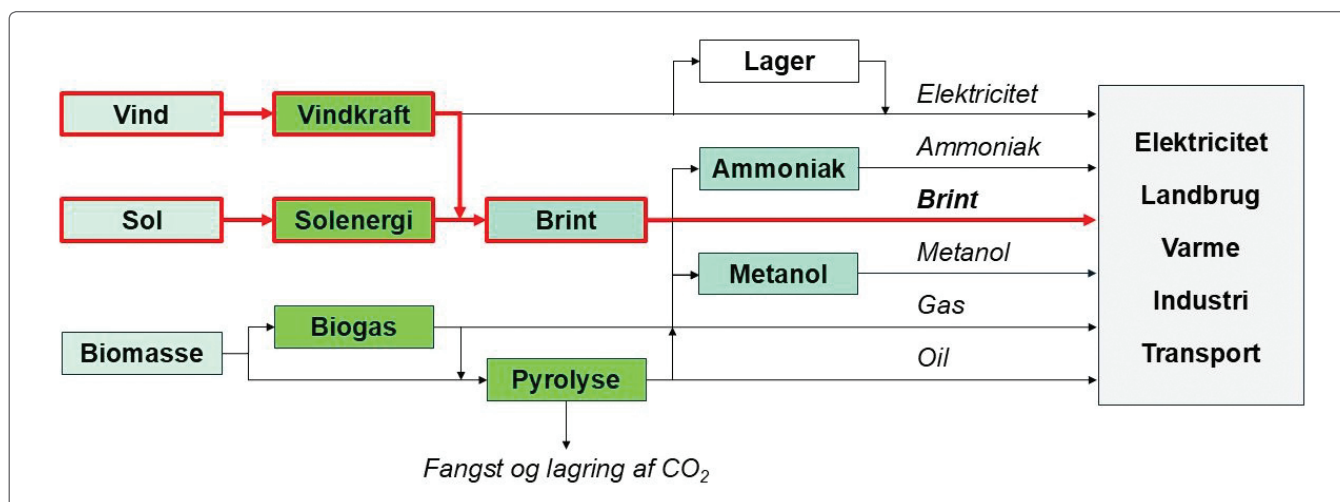
Grøn brint fremstilles ved elektrolyse af vand. Ved hjælp af elektricitet fra vedvarende energi spaltes vand ( $H_2O$ ) til brint ( $H_2$ ) og ilt ( $O$ ). De frie iltatomer binder sig hurtigt til hinanden og danner iltmolekyler ( $O_2$ ):



Rent praktisk foregår brintproduktionen i et elektrolyseapparat. Her samles en lang række elektrolyseceller i en stak, der typisk består af flere hundrede celler og forsynes med jævnstrøm fra en ensretter. Hver celle består af en katode (negativ elektrode) og en anode (positiv elektrode), adskilt af en separator. Brinten dannes ved katoden, mens iltten dannes ved anoden. Separatoren gør det muligt for ioner at bevæge sig mellem elektroderne og forhindrer samtidig, at brint og ilt blandes.

Brinten opsamles til opbevaring eller direkte anvendelse, mens iltten som regel blot udledes til atmosfæren. Det forekommer egentlig oplagt også at opsamle og komprimere iltten til industriel an-

Figur 1  
Anvendelse af grøn strøm til produktion af brint.



vendelse, men i praksis er det for svært at konkurrere med konventionel produktion af ilt ved destillation af luft.

Når elektrolyseprocessen drives af vedvarende energi, er brintproduktionen næsten CO<sub>2</sub>-fri. De mindre emissioner, der forekommer, stammer fra produktionen og driften af de vedvarende energikilder og fra fremstillingen af selve elektrolyseanlægget.

Der findes flere elektrolyseteknologier, hvoraf de vigtigste er:

- Alkalisk elektrolyse
- PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolyse
- SOEC (Solid Oxide Electrolytic Cell) elektrolyse.

Valget af elektrolyseteknologi afhænger af, hvor brinten skal bruges, hvor meget der skal produceres, og hvor fleksibel produktionen skal være i forhold til udsving i strømforsyningen.

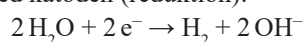
Den kemiske reaktion, der foregår ved elektrolysen, er forskellig for de tre teknologier, og det giver hver af teknologierne deres egne fordele og ulemper.

Alkalisk elektrolyse foregår i en vandig opløsning af en stærk base, typisk kaliumhydroxid (KOH) i koncentrationer på 20 – 40 % og ved temperaturer mellem 60 og 90 °C. De fleste af os har set simple elektrolyseforsøg i skolen, og de har været (eller lignet) alkalisk elektrolyse.

Systemet består af to elektroder adskilt af en porøs separator, som tillader iontransport.

I alkalisk elektrolyse foregår disse elektrodeprocesser

Ved katoden (reduktion):



Ved anoden (oxidation):



Hydroxidioner (OH<sup>-</sup>) bevæger sig altså fra katoden til anoden. Det sker gennem

en porøs separator, der normalt er fremstillet af et mikroporøst polymermateriale som polysulfon med et indlagt plastvæv til forstærkning. Når man anvender netop polysulfon, er det, fordi det er det billigste plastmateriale, der kan overleve under de ret barske forhold i systemet – høj temperatur, stærkt basisk miljø og fuld iltmætning. Som så mange andre plastmaterialer er polysulfon hydrofob og vil nødtigt vædes, som det skal for at kunne transportere hydroxidionerne. Man tilsætter derfor et hydrofilt materiale under fremstillingen af membranen, typisk zirconiumoxid, og det sikrer, at separatoren ender med at være hydrofil og derfor gerne optager den vandige elektrolyt.

Elektroderne er oftest baseret på nikkel eller forniklet stål, som har god elektrokatalytisk aktivitet i basiske opløsninger. Nikkelbelægninger kan være dopet med molybdæn, svovl eller andet for at øge reaktiviteten.

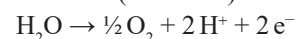
Alkalisk elektrolyse er den ældste og mest gennemprøvede teknologi. Den har været i brug i over 100 år og har derfor stor modenhed. Materialerne er relativt billige og har god holdbarhed, og teknologien er generelt robust overfor urenheder i elektrolytten, der kan stamme fra fødevandet eller være korrosionsprodukter fra selve systemet.

Ulemperne er primært begrænset fleksibilitet ved dynamisk drift. Hvis strømmen reduceres under en vis grænse, bliver gasdiffusionen gennem separatoren relativt mere dominerende, og det øger risikoen for blanding af ilt og brint. Derfor slukker man normalt for alkaliske elektrolyseapparater, når strømmen når under 15 – 20 % af mærkestrømmen.

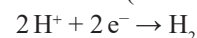
PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolyse anvender en sur, fast elektrolytmembran, som tillader protontransport, men er impermeabel for gasser. De mest anvendte membraner er perfluorerede sulfonerede polymerer, der kombinerer høj protonledning med kemisk stabilitet.

De elektrokemiske reaktioner er:

Ved anoden (oxidation):



Ved katoden (reduktion):

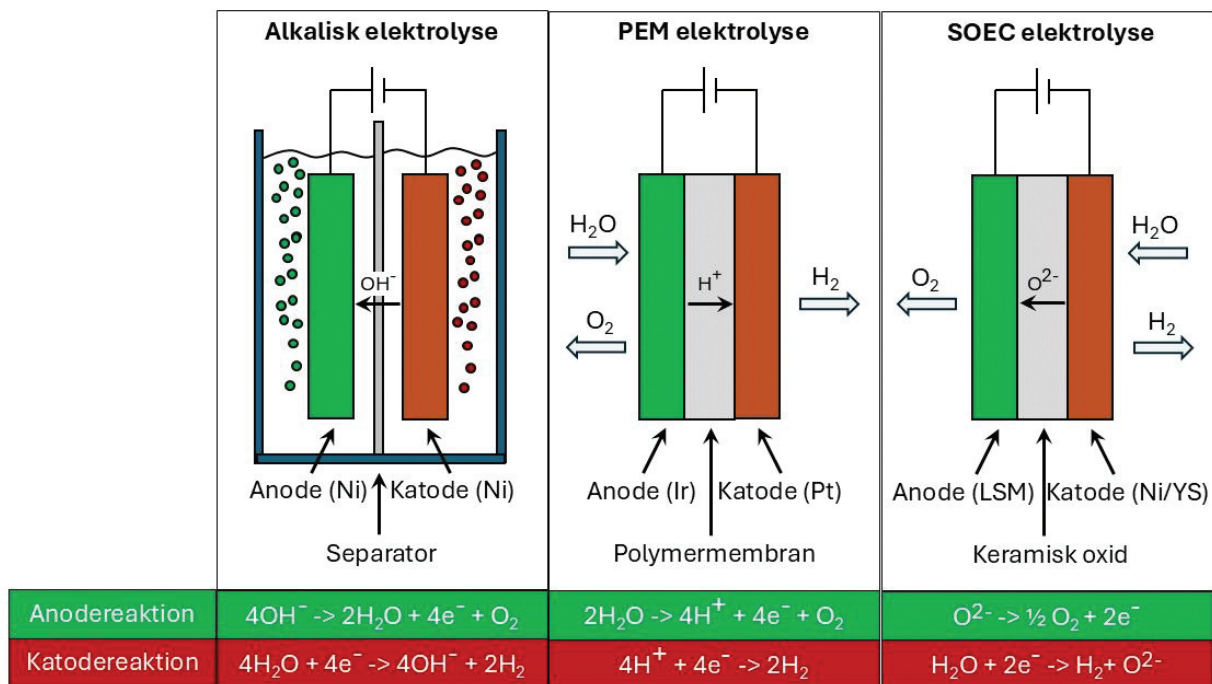


Vand tilføres på anodesiden, hvor det spaltes til ilt, protoner og elektroner. Protonerne transporteres gennem membranen til katodesiden, hvor de reduceres til brint.

Materialerne er mere avancerede end ved alkalisk elektrolyse. Katodematerialet er normalt platin (Pt) eller platinlegeringer. Anodematerialet er næsten altid iridiumoxid (IrO<sub>2</sub>). Når man i PEM er nødt til at bruge et så sjældent metal som iridium til anoden, skyldes det, at de frie brintioner (H<sup>+</sup>) fra elektrolyseprocessen giver et surt miljø, selvom processen baserer sig på rent vand. En kombination af et surt miljø, høj temperatur og oxidative forhold er særdeles korrosiv, og iridium er indtil videre det eneste metal, man har fundet, som kan holde til det. Ikke engang platin står distancen under sådanne forhold.

PEM-elektrolyse er af nyere oprindelse end alkalisk elektrolyse. Teknologien har hurtig responstid og er godt egnet til dynamisk drift (f.eks. sammen med sol og vind). Da anode- og katodesiden er adskilt af en fast membran og ikke en porøs separator som ved alkalisk elektrolyse, er gasdiffusionen mellem ilt- og brint-siden mindre, og derfor kan PEM-elektrolyse køres ned til meget lavere belastning end alkalisk elektrolyse.

Den største ulempe ved PEM-elektrolyse er materialekravene. Iridium er et virkelig sjældent metal, og mens prisen for nikkel for tiden er ca. 100 kr. pr. kg, er den i omegnen af en million kr. pr. kg for iridium. Man forsøger derfor på mange forskellige måder at nedbringe materialeforbruget, men der er et vist minimum, man ikke kan komme under, og det kan ikke undgå at påvirke prisen. Også for membranen er materialerne et problem, fordi den perfluorinerede polymer er en PFAS. Dertil kommer, at både membranen og elektrodematerialerne er ret følsomme over for urenheder i vandet. Man



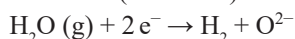
Figur 2  
De tre almindelige elektrolyseteknologier.

er derfor nødt til at operere med ultrarent vand, som giver højere omkostninger.

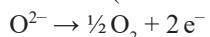
SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) adskiller sig fra de øvrige ved at fungere ved høje temperaturer, normalt 600 – 800 °C. Elektrolytten er en keramisk leder af oxidioner, typisk yttria-stabiliseret zirconiumoxid (YSZ), som tillader transport af  $\text{O}^{2-}$ -ioner.

De elektrokemiske reaktioner er:

Ved katoden (reduktion):



Ved anoden (oxidation):



Vand tilføres som damp til katoden. Her reduceres det til hydrogen og oxidioner, som bevæger sig gennem den faste elektrolyt og oxideres til ilt ved anoden. Her er det altså  $\text{O}^{2-}$ -ioner, der transporteres gennem elektrolytten.

Også i SOEC-teknologien er materialerne ret avancerede. Katodematerialerne er

typisk nikkel- og cerumbaserede kompositter (Ni-YSZ), hvor YSZ er yttria-stabiliseret zirconiumoxid. På anoden anvendes lantanhæmmede perovskitmaterialer, f.eks. lanthanstrontium manganit (LSM), eventuelt kombineret med ceriumoxid.

Elektrolytten er en fast, keramisk ilt-ionleder, typisk YSZ. Den skal være tæt og mekanisk stabil ved høje temperaturer.

Fordelen ved SOEC er, at virkningsgraden kan blive meget høj, fordi de elektrokemiske reaktioner foregår meget villigt ved høj temperatur. Det duer til gengæld ikke, hvis man skal bruge el til at frembringe varmen, for så gør elforbruget, at den samlede virkningsgrad falder til det samme niveau som for alkalisk og PEM-elektrolyse. SOEC-elektrolyse egner sig derfor primært til anvendelse, hvor man har adgang til spildvarme ved høj temperatur.

Udfordringerne er primært materialernes mekaniske og kemiske stabilitet over tid. Termisk cykling, spændingsbelastning og urenheder i dampen kan føre til nedbrydning af elektroder, delaminering eller

revnedannelse. Samtidig er opstartstiden længere end for lavtemperaturteknologier, og systemintegration er mere kompleks.

De tre elektrolyseteknologier adskiller sig altså grundlæggende i driftsbetingelser, materialer og anvendelsesområder. Alkalisk elektrolyse er robust og billig, men mindre fleksibel. PEM-elektrolyse er velegnet til variable strømforsyninger og har kompakt design, men højere pris. SOEC tilbyder den højeste effektivitet, hvis varme er tilgængelig, men har større kompleksitet og kortere levetid under visse driftsformer. Valget afhænger af rammebetingelser som energikilde, ønsket tryk, vandkvalitet, dynamisk belastning og anlægsøkonomi.

Figur 2 viser en sammenligning mellem elektrodearrangementerne og processerne i de tre teknologier.

Her i Europa og også i Kina, der er det førende land på produktion af grøn brint, er alkalisk elektrolyse dominerende, og i resten af denne artikel koncentrerer vi os om den alkaliske teknologi.

Nu skal vi se lidt nærmere på strømme, spændinger og virkningsgrader.

I processen opererer vi med et startpotentiale. Det er den spænding, der skal til for at få processen til at forløbe.

Startpotentialet beregnes med formlen:

$$E = \frac{\Delta H^0}{n F}$$

hvor

$E$  er startpotentialet

$\Delta H^0$  er reaktionsentalpien,

$\Delta H^0 = 286 \text{ kJ/mol}$

$n$  er antallet af mol elektroner

pr. mol brint, i dette tilfælde 2

$F$  er Faradays konstant,

$F = 96.485 \text{ C/mol}$

Indsætter vi værdierne i ligningen, får vi et startpotentiale på 1,48 V.

Hvis vi påtrykker elektroderne en spændingsforskel, der er lavere end 1,48 V, sker der ikke noget. Hvis vi derpå forøger spændingen op over 1,48 V, begynder der at ske noget. Så går der en strøm mellem elektroderne, og vi producerer brint.

Sammenhængen mellem den elektriske strøm og den mængde brint, vi producerer, styres af Faradays lov for elektrolyse. Faradays lov siger, at mængden af brint er proportional med den elektriske ladning, der passerer gennem systemet:

$$n_{\text{H}_2} = \frac{I t}{n F}$$

hvor

$n_{\text{H}_2}$  er antal mol  $\text{H}_2$  produceret

$I$  er strømmen

$t$  er tiden

$n$  er antallet af mol elektroner

pr. mol brint, i dette tilfælde 2

$F$  er Faradays konstant,

$F = 96.485 \text{ C/mol}$

Produktet af  $I$  og  $t$  er jo ladningen, og indsætter vi værdierne i formlen, får vi, at det kræver 193.000 C at producere ét mol  $\text{H}_2$ .

Hvis vi ved 1,48 V kunne få 675 A gennem vores elektroder, ville det svare til

en effekt på 1 kW. Over en time bliver den tilførte energi 1 kWh i vores anlæg. De 675 A i 3600 s svarer til en ladning på 2.432.000 C, og med 193.000 C pr. mol  $\text{H}_2$  producerer vi 12,6 mol  $\text{H}_2$ , som har massen 25,4 g. Det kræver dermed 39,4 kWh for at producere 1 kg brint ved 1,48 V.

Nu er verden imidlertid ikke sådan indrettet, at vi kan få nogen nævneværdig strøm gennem vores elektroder ved at påtrykke en spænding svarende til startpotentialet. Vi skal noget højere op i spænding for at få en rimelig strømstyrke. Årsagen til det er, at der er flere forskellige, strømfælgende spændingsfald i systemet. Først er der et bidrag fra den såkaldte aktiveringsoverspænding, som afspejler den energi, der skal til for at få elektronerne til at drive reaktionerne ved elektroderne. Aktiveringsoverspændingen er forskellig på anode- og katodesiden, og den samlede overspænding er summen af de to. Dernæst kommer der et bidrag til spændingsfaldet fra den ohmske modstand i elektroderne, elektrolytten og separatoren. Endelig er der et bidrag fra ikke-optimale fysiske forhold som f.eks. maske-ring af de aktive overflader af gasbobler.

Disse forhold indebærer, at man skal en del over startpotentialet for at få nævneværdig strøm gennem systemet. Da den afsatte effekt er proportional med spændingen, kan vi beregne cellevirkningsgraden til:

$$\eta = \frac{E}{U}$$

hvor

$\eta$  er cellevirkningsgraden

$E$  er startpotentialet

$U$  er celspændingen

Når man ser nærmere på processen og sammenligner forskellige elektrodetyper med hinanden, er det normalt at se på strømtæthed, altså strømmen pr. areal, og ikke på selve strømmen. Sidstnævnte afhænger jo af de fysiske dimensioner på elektroderne, og ved i stedet at bruge strømtætheden, får man et billede af forholdene, der er uafhængig af den praktiske udførelse.

Inden for elektrolyse opererer man af historiske årsager med den noget arkaiske enhed kvadratcentimeter, og strømtætheden opgives normalt i  $\text{mA/cm}^2$ .

Polarisationskurven for en elektrolysecelle er en afbildning af den spændingsforskel mellem elektroderne, der skal til for at nå en vis strømtæthed. Man kunne på sin vis synes, at det var mere oplagt at afbilde den strømtæthed, man får ved at påtrykke en vis spænding, men i praksis vælger elektrolyseoperatøren strømmen og observerer så, hvad der skal til af spænding, og det er baggrunden for diagrammets orientering.

Figur 3 viser polarisationskurverne for forskellige elektroder.

Som det ses, kan man med forskellige elektroder få vidt forskellige polarisationskurver. Nogle af kurverne går ned under startpotentialet på 1,48 V, nogle endda helt ned under 1,4 V. Det skal man ikke lægge for meget i, årsagen er dynamiske forhold i elektrokemien ved start og stop.

Når polarisationskurverne har den viste form, skyldes det, at de forskellige spændingsfald, som blev beskrevet ovenfor, afhænger af strømtætheden på hver deres måde.

I et typisk kommercielt elektrolyseapparat er strømtætheden 220  $\text{mA/cm}^2$ . Dette anlæg bruger den type elektroder, der i diagrammet betegnes som "Bridge plates". Elektrodespændingen kan aflæses til 1,84 V ved de 220  $\text{mA/cm}^2$ .

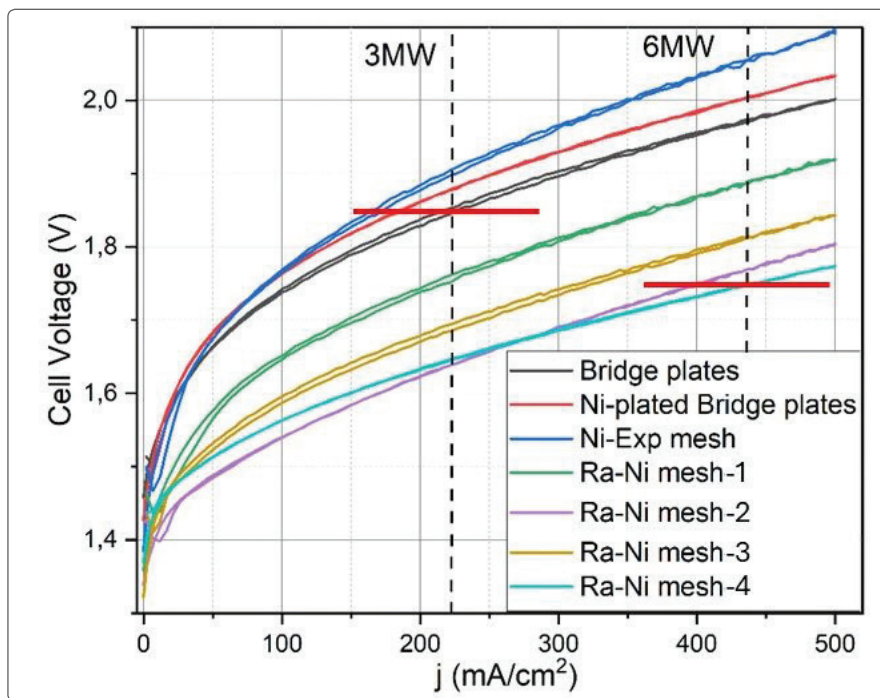
Som beskrevet ovenfor, koster det virkningsgrad, at spændingsfaldet over elektrodene er højere end startpotentialet. Vi kan beregne cellevirkningsgraden til

$$\eta = \frac{U_0}{U} = \frac{1,48 \text{ V}}{1,84 \text{ V}} = 80 \%$$

De 20 %, der tabes, går til opvarmning af elektrolytten. Det er derfor vigtigt at sørge for god køling, ellers bliver systemet for varmt.

I Figur 3 beskriver de kurver, der betegnes som "Bridge plates" og "Ni-Exp





Figur 3  
Polarisationskurver.

mesh" (en slags strækmetal), cellespændingerne for konventionelle elektroder, mens kurverne for "Ra-Ni" betegner cellespændingerne for nikkelelektroder, der har undergået en særlig proces for at opnå et større overfladeareal.

"Ra" er en forkortelse for Raney-nikkel, en type nikkel med meget stor aktiv overflade. Fremgangsmåden til at opnå den store overflade blev opfundet af den amerikanske kemiker Murray Raney tilbage i 1920'erne.

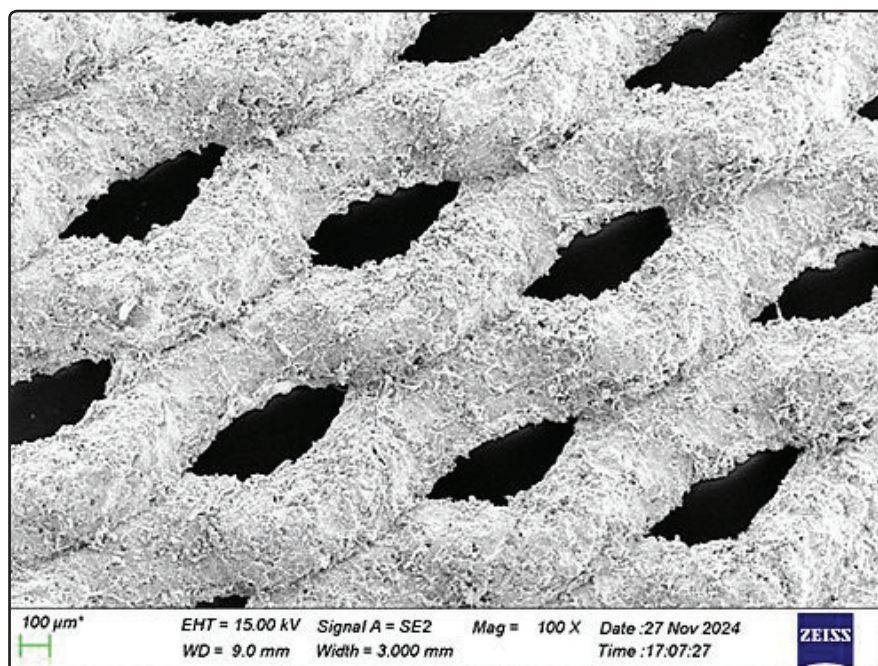
Man laver Raney-nikkel ved at belægge et nikkelsubstrat med et andet og mindre ædelt metal, typisk zink eller aluminium. Efter belægning opvarmes substratet til en høj temperatur, ofte 7–800 °C. Her sker der såkaldt interdiffusion, hvor metallerne diffunderer ind i hinandens gitterstrukturer. Efter varmebehandling i en

vis tid, afkøles substratet, og derpå ætzes det mindre ædle metal væk i en stærk base. Resultatet er en meget porøs nikkeloverflade, som har et overfladeareal, der kan være op til 1000 gange større end det projicerede areal af substratet. Den meget større overflade gør Raney-nikkel særligt effektivt til katalytiske reaktioner, herunder brintudvikling i alkalisk elektrolyse.

Figur 4 viser et elektromikroskopfoto af en af de Raney-elektroder, der er brugt til eksperimenterne, som er vist i figur 3.

På Figur 3 kan vi se, at den bedste Raney-nikkelelektrode har en cellespænding på 1,63 V ved en strømtæthed på 220 mA/cm<sup>2</sup>. Det giver en cellevirkningsgrad på 1,48 V/1,63 V = 90 %. Vi ser også, at denne elektrode har en cellespænding på 1,75 V ved 440 mA/cm<sup>2</sup>, svarende til 6 MW effekt på hele elektrolyseapparatet. Den tilhørende cellevirkningsgrad er 84 %, altså hele 4 procentpoint højere end for den konventionelle elektrode ved den halve effekt. Så det kan godt betale sig at lægge kræfter i udvikling af elektrodeoverfladerne!

Cellevirkningsgraden har den største betydning for den samlede virkningsgrad af et elektrolyseapparat, men der er andre faktorer, som gør, at den samlede



Figur 4  
Raney-nikkel.





Figur 5  
Montage af elektrodestak i tryktank.

virkningsgrad bliver lidt ringere. Der er tab i strømforsyning og kabler, der går effekt til at drive pumper og køleblæsere, og der er andre parasitiske tab. Man regner normalt med, at der skal fratrækkes yderligere 5 %, så et system med en cellevirkningsgrad på 80 % har en samlet virkningsgrad på 75 %.

Virkelige brintanlæg har en anelig størrelse. Figur 5 viser et 3 MW elektrolyseapparat, hvor elektrodestakken, der består af 680 celler, er ved at blive ført ind i sin tryktank.

Når det overhovedet er relevant at tale om tryk i forbindelse med brintanlæg, så skyldes det, at man med fordel kan producere brinten under tryk for at mindske behovet for efterfølgende kompression. Tryksætning ved produktion sker ved, at man tilfører fødevandet under tryk og har en trykstyring på gasudløbet, så man ikke leverer gas, før trykket er oppe på det ønskede niveau. Fordelen ved dette arrangement er, at det stort set ikke koster noget at sætte tryk på vandet, mens det koster en del at skulle komprimere gas-

sen bagefter. Selve gassens kompressibilitet giver anledning til opvarmning ved den adiabatisk kompression, og denne opvarmning skal så efterfølgende køles bort. Det undgår man helt ved at foretage tryksætningen på vandet, der som flydende medium er stort set inkompressibelt.

Graden af kompression afhænger af, hvad brinten skal bruges til. Man opererer normalt med en øvre grænse på 35 bar. Årsagen til denne grænse er, at ilt, som uundgåeligt følger brinten i tryk, helst ikke skal for meget højere op i tryk. Efter 40 bar begynder ilt at blive rigtig farligt, fordi der lettere sker selvantændelse.

Grøn brint har mange anvendelser. Den vigtigste og mest oplagte er at erstatte den såkaldte grå brint, det vil sige brint fremstillet ud fra naturgas. Verden bruger i dag omkring 100 millioner tons grå brint årligt, primært i raffinaderier, til gødningsproduktion og i den kemiske industri. Ved fremstilling af grå brint udledes 11 til 14 kg CO<sub>2</sub> pr. kg brint, så alene ved at erstatte den eksisterende grå brint kan

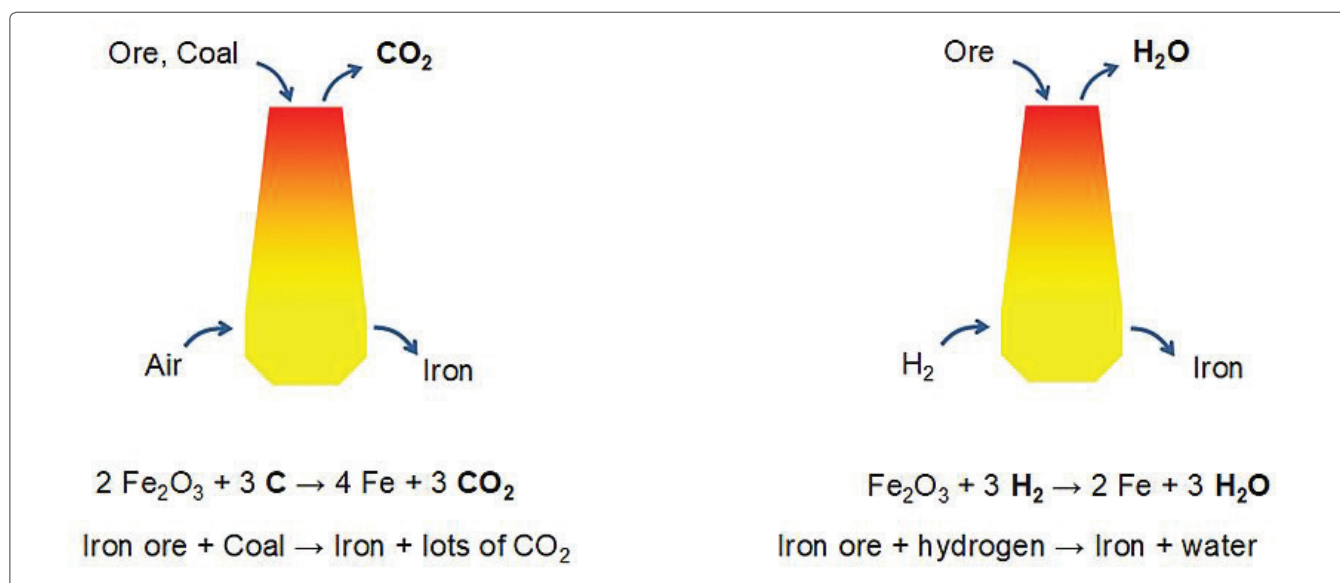
vi reducere den årlige CO<sub>2</sub>-udledning med over en milliard ton.

Dernæst kommer nye anvendelser af brint som erstatning for fossile brændsler.

Den vigtigste er formentlig at erstatte kul med brint i stålproduktionen. Jern forekommer ikke i ren form i naturen, men kun som iltet jern i jernmalm. Vi kender også iltet jern som rust. I stålproduktion fjernes ilt fra jernmalmen ved opvarmning i en højovn, hvor malmen er blandet med kul. Kulstof har en større kemisk tiltrækning til ilt end jern, så ilt bevæger sig fra jernet over til kullet. Resultatet bliver rent jern og kuldioxid, CO<sub>2</sub>, som biprodukt. Udledningerne fra stålproduktion udgør omtrent 7 procent af de samlede CO<sub>2</sub>-udledninger globalt.

Brint har ligesom kulstof en højere affinitet til ilt end jern, så hvis man erstatter kullet i processen med brint, dannes der rent jern og vand, H<sub>2</sub>O, som biprodukt.

Denne metode, som man kalder direkte reduktion med brint, er teknisk gen-



Figur 6  
Princippet i direkte reduktion af jernmalm.

nemprøvet og afprøves nu i fuld skala i blandt andet Sverige og Tyskland. Hvis teknologien udbredes bredt og drives med vedvarende energi, kan den reducere de samlede årlige globale udledninger med op til 6 til 7 procent, svarende til over 2 milliarder ton CO<sub>2</sub>.

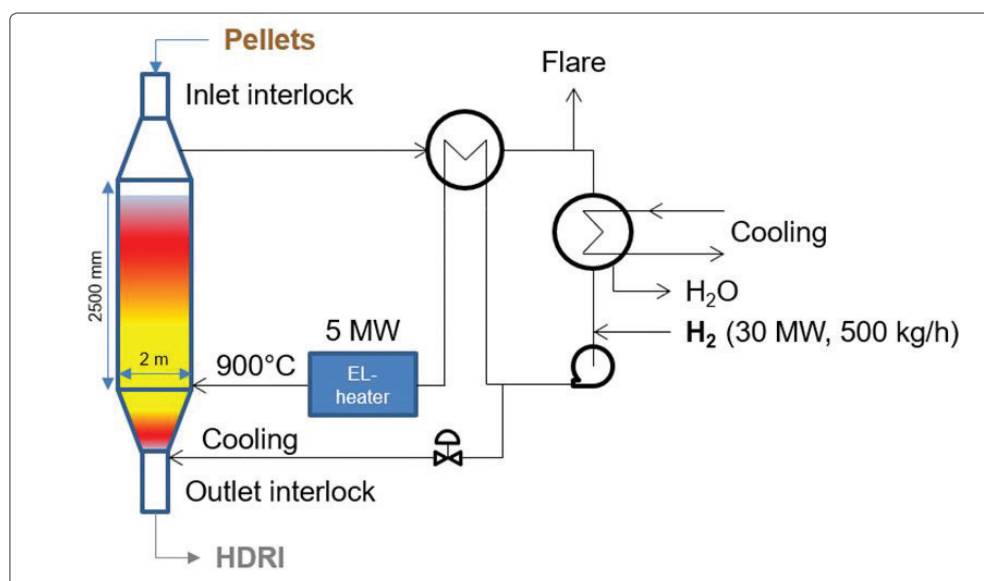
Figur 6 viser princippet i direkte reduktion af jernmalm, og figur 7 viser en simpel reaktor, der kan reducere ca. 250 tons jern i døgnet.

Grøn brint kan også kombineres med grønt kulstof fra planter til at fremstille metanol, som er en vigtig bestanddel i den kemiske industri, især i produktionen af plast. Metanol er desuden en af kandidaterne til fremtidens skibsbrændstoffer, og Mærsk har allerede 25 metanoldrevne skibe enten i drift eller i ordre.

Ammoniak er en anden kandidat til at blive fremtidens skibsbrændstof. I forhold til metanol har ammoniak den me-

get store fordel, at det med et molekyle, der alene består af brint og kvælstof, ikke kræver grønt kulstof. Grønt kulstof ender nemlig med at blive en mangelvare, når vi overgår til et fossilfrit samfund.

Ammoniak har til gengæld den ulempe, at det er giftigt. Heldigvis kan man lugte ammoniak i koncentrationer, der er langt under grænseværdien for sikker anvendelse. På skibe arrangerer man brændstofssystemet med dobbeltrør, så



Figur 7  
Industrialiseret system til produktion af jern.



alle brændstofrørene fra tanken til motoren og rundt til de forskellige cylindre omgives med et ydre rør. Man tilslutter så en vakuumpumpe til mellemrummet mellem brændstofrøret og det ydre rør og placerer en ammoniaksensor på udblæsningen fra vakuumpumpen. På den måde opnår man, at en lækage i brændstofsyste- met ikke giver anledning til risiko for forgiftning i maskinrummet, men i stedet opdages ved, at ammoniaksensoren giver alarm. Når der kommer en alarm, kan man fejlfinde under anvendelse af det nødvendige sikkerhedsudstyr.

Metanol og ammoniak har begge en brændværdi, der rundt regnet er det halve af brændværdien for normal fuelolie, og man skal derfor have noget større brændstoftanke til de grønne brændstoffer. Ammoniaktanken skal også kunne tåle 10 – 15 bar tryk.

En anden vigtig anvendelse af grøn brint er som energilager. Et af de store problemer ved sol og vind er, at produktionen ikke altid passer med forbruget. Her kan brint bruges til at lagre energi. Når der er overskud af strøm, kan man anvende den til at producere brint, og når der senere opstår mangel, kan brinten bruges til at generere strøm igen, for eksempel i dieselmotorer eller ældre kraftværker. Der er et vist energitab i processen, men hvis en stor del af elproduktionen kommer fra vedvarende kilder, spiller dette tab en mindre rolle i det samlede billede. Det er muligt at opnå et helt grønt elsystem, uden at det bliver dyrere end det nuværende.

Selve lagringen af brinten kan ske i gasform, for eksempel i et af de to gaslagre, vi har i Danmark, eller i flydende form efter konvertering til ammoniak.

Produktionen af grøn brint er stadig begrænset, men mange lande har store planer. Danmark har med sin betydelige vindkraft en særlig god position til at producere grøn brint og blive eksportør til resten af Europa.

Sammenfattende er grøn brint ikke en mirakelløsning, men et vigtigt supplement i den grønne omstilling. Den kan især gøre det muligt at anvende vedvarende energi til at nedbringe udledningerne fra sektorer, hvor det ellers er meget vanskeligt – navnlig i tung industri og tung transport.

## OPLEV EN NAT PÅ OLE RØMER OBSERVATORIET

### MED FORMIDLING FOR SKOLEKLASSER OG ANDRE GRUPPER

Gå i astronomernes fodspor med en nat i Sciencehytterne på Ole Rømer Observatoriet i Aarhus.

Her får I rig mulighed for at opleve og udforske årtidens stjernehimmel samt den omkringliggende Sciencepark.

Scan QR koden, og læs mere.



Gratis adgang til STENO MUSEET for LMFKs medlemmer samt én ledsager. Desuden gives 10 kr. i rabat på planetariebilletter.

OLE RØMER OBSERVATORIET  
STENO MUSEET  
VÆKSTHUSENE  
OFFENTLIGE FOREDRAG I NATURVIDENSKAB

**SCIENCE  
MUSEERNE**  
AARHUS UNIVERSITET