

Grøn brint

Henrik Stiesdal

Grøn brint bliver et centralt element i den grønne omstilling, fordi den muliggør anvendelsen af vedvarende energi i sektorer, der ikke kan elektrificeres direkte, såsom tung transport og højtemperaturindustri. Brint produceres via elektrolyse drevet af grøn strøm og fungerer som en fleksibel energibærer med bred anvendelighed, fra stålproduktion til syntese af metanol og ammoniak. Artiklen gennemgår de tre dominerende elektrolyseteknologier – alkalisk, PEM og SOEC – samt deres effektivitet, materialekrav og driftsforhold. Endelig belyses brintens potentiale for at erstatte både grå brint og fossile brændsler, hvilket kan reducere globale CO₂-udledninger markant og placere Danmark som en vigtig producent i fremtidens energisystem.

Grøn brint spiller en stor rolle i den energiomstilling, vi har foran os.

I energiomstillingen 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.

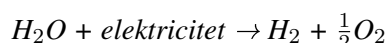
Selvom den foretrukne energiform er elektricitet, er der stadig store dele af samfundet, som ikke umiddelbart kan elektrificeres. Det gælder navnlig dele af transportsektoren, højtemperaturprocesser i industrien m.v. Hvis man skal gå fra grøn strøm til andre produkter end el og varme, er der kun én vej: produktion af brint ved elektrolyse. Brint er den eneste vektor fra grøn strøm til andre produkter.

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.

Elektrolyse af vand

Grøn brint fremstilles ved elektrolyse af vand. Ved

hjælp af elektricitet fra vedvarende energi spaltes vand (H₂O) til brint (H₂) og ilt (O₂):



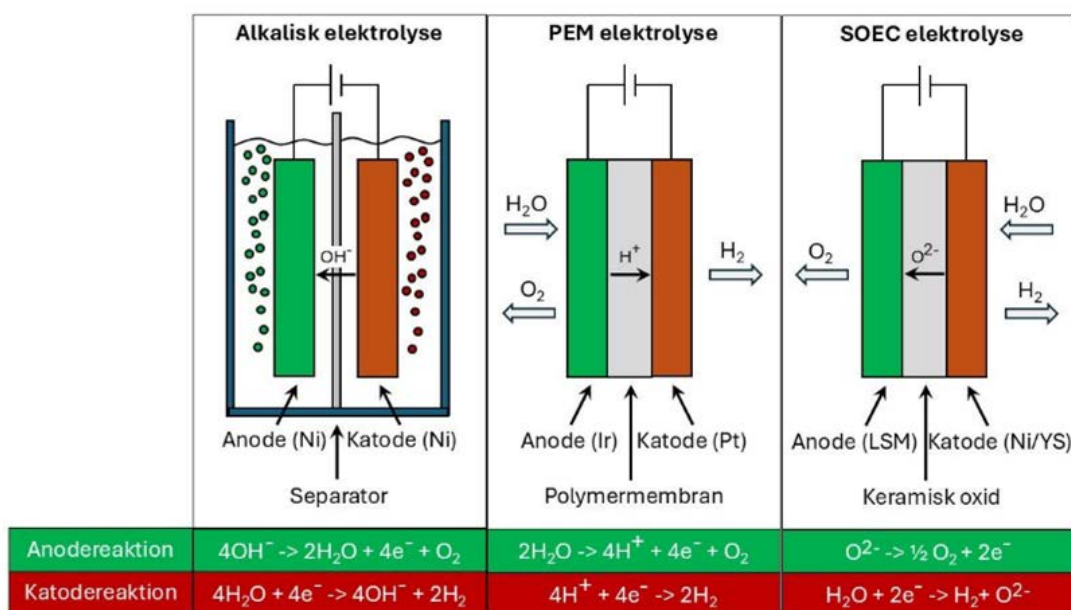
Rent praktisk foregår brintproduktionen i et elektrolyseapparat. Her samles en lang række elektrolyseceller i en stak, der typisk består af flere hundrede celler og forsynes med jævnstrøm fra en ensretter.

Hver celle består af en katode og en anode, adskilt af en separator. Brinten dannes ved katoden, mens ilten dannes ved anoden. Separatoren gør det muligt for ioner at bevæge sig mellem elektroderne og forhindrer samtidig, at brint og ilt blandes.

Når elektrolyseprocessen drives af vedvarende energi, er brintproduktionen næsten CO₂-fri. De mindre emissioner stammer fra produktionen af de vedvarende energikilder og fra fremstillingen af selve elektrolyseanlægget.

Tre elektrolyseteknologier

I brintindustrien anvendes tre forskellige elektrolyseteknologier.



Figur 1. De tre almindelige typer af elektrolyse.

Alkalisk elektrolyse foregår i en vandig opløsning af kaliumhydroxid (KOH) ved temperaturer mellem 60 og 90 °C. Systemet består af to elektroder adskilt af en porøs separator. Hydroxidioner (OH^-) bevæger sig fra katoden til anoden gennem separatore, der normalt er fremstillet af polysulfon. Elektroderne er oftest baseret på nikkel eller fornicket stål.

Alkalisk elektrolyse er den ældste og mest gennemprøvede teknologi. Den har været i brug i over 100 år. Materialerne er relativt billige og har god holdbarhed. Ulemperne er primært begrænset fleksibilitet ved dynamisk drift. 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. Vand tilføres på anodesiden, hvor det spaltes til ilt, protoner og elektroner. Protonerne transporteres gennem membranen til katodesiden, hvor de reduceres til brint.

PEM-elektrolyse har hurtig responstid og er godt egnet til dynamisk drift. Den største ulempe er materialekravene. Anodematerialet er næsten altid iridiumoxid, og iridium er et virkelig sjældent metal med en pris i omegnen af en million kr. pr. kg, sammenlignet med ca. 100 kr. pr. kg for nikkel.

SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) adskiller sig fra de øvrige ved at fungere ved høje temperaturer, normalt 600–800 °C. Fordelen er, at virkningsgraden kan blive meget høj, fordi de elektrokemiske reaktioner foregår meget villigt ved høj temperatur. SOEC-elektrolyse egner sig derfor primært til anvendelse, hvor man har adgang til spildvarme ved høj temperatur.

De tre teknologier adskiller sig grundlæggende i driftsbetingelser, materialer og anvendelsesområder. Her i Europa og også i Kina, som er det førende land på produktion af grøn brint, er alkalisk elektrolyse dominerende.

Strømme, spændinger og virkningsgrader

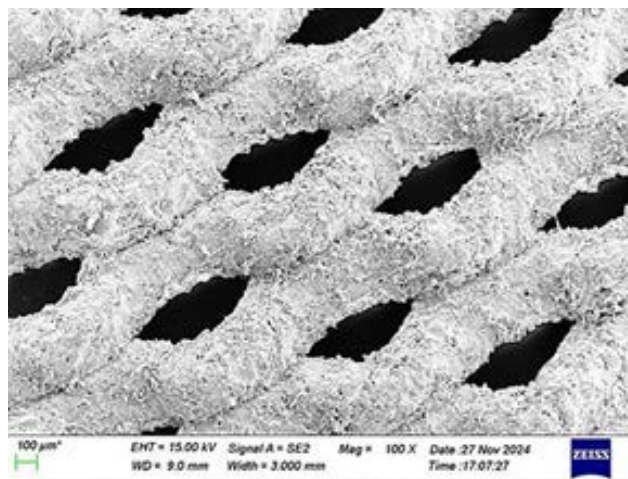
I elektrolyseprocessen opererer vi med et startpotentiale på 1,23 V. Det er den spænding, der skal til for at få processen til at forløbe. Hvis vi påtrykker elektroderne en spændingsforskel, der er lavere end 1,23 V, sker der ikke noget. Selv ved en spænding lige over 1,23 V sker der meget lidt, og man regner normalt med, at 1,48 V er den laveste spænding, som giver en egentlig produktion af brint.

Det kræver 39,4 kWh at producere 1 kg brint ved 1,48 V. I praksis skal vi imidlertid noget højere op i spænding for at få en rimelig strømstyrke. Årsagen er, at der er flere forskellige, strømfafhængige spændingsfald i systemet: aktiveringsoverspænding ved elektroderne, ohmsk modstand i elektroderne og elektrolytten, og bidrag fra ikke-optimale fysiske forhold, fx maskering af de aktive overflader af gasbobler.

I et typisk kommercielt elektrolyseapparat er strømtætheden 220 mA/cm². Ved denne strømtæthed er elektrodespændingen typisk 1,84 V for konventionelle elektroder. Det giver en celle-virkningsgrad på 1,48 V / 1,84 V = 80%. De 20%, der tabes, går til opvarmning af

elektrolytten.

Ved at udvikle bedre elektrodeoverflader kan man forbedre virkningsgraden betydeligt. Ved at belægge nikkelelektroder med Raney-nikkel, som er en særligt porøs form for nikkel med et overfladeareal, der kan være op til 1000 gange større end det projicerede areal, kan man opnå celledspændinger helt ned til 1,63 V ved 220 mA/cm², svarende til en cellevirkningsgrad på 90%.



Figur 2. Scanning-elektronmikroskopi af overfladen af en elektrode udført med Raney-nikkel. Det aktive areal er ca. 1000 gange større end det projicerede areal.

Cellevirkningsgraden har den største betydning for den samlede virkningsgrad, men der er andre faktorer som tab i strømforsyning og kabler og effekt til pumper og køleblæsere. Man regner normalt med, at der skal fratrækkes yderligere 5%, så et system med en cellevirkningsgrad på 80% har en samlet virkningsgrad på 75%.

Tryksætning

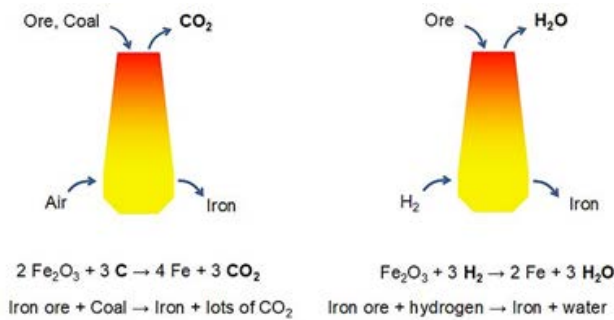
Man kan med fordel producere brinten under tryk for at mindske behovet for efterfølgende kompression. Fordelen er, at det stort set ikke koster noget at sætte tryk på fødevandet, som i processen omdannes til brint og ilt, mens det koster en del at skulle komprimere gassen bagefter. Ved tryksætning opererer man normalt med en øvre grænse på 35 bar. Årsagen er, at ilten, som uundgåeligt følger brinten i tryk, helst ikke skal for meget højere op. Efter 40 bar begynder ilt at blive rigtig farligt, fordi der lettere sker selvantændelse.

Anvendelse af grøn brint

Grøn brint har mange anvendelser. Den vigtigste er at erstatte den såkaldte grå brint, som er 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 CO₂ pr. kg brint, så alene ved at erstatte den eksisterende grå brint kan vi reducere den årlige CO₂-udledning med over en milliard ton.

Dernæst kommer nye anvendelser som erstatning for fossile brændsler. Den vigtigste er formentlig at erstatte

kul med brint i stålproduktionen. I stålproduktion fjernes ilten fra jernmalmen ved opvarmning i en højovn, hvor malmen er blandet med kul. Resultatet bliver rent jern og kuldioxid, CO₂, som biprodukt. Udledningerne fra stålproduktion udgør omtrent 7 procent af de samlede CO₂-udledninger globalt.



Figur 3. Traditionel udvinding af jernmalm sammenlignet med en grøn brintbaseret proces.

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, H₂O, som biprodukt. Denne metode, som man kalder direkte reduktion med brint, er teknisk gennemprøvet 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 6–7 procent, svarende til over 2 milliarder ton CO₂.

Grøn brint kan også kombineres med grønt kulstof fra planter til at fremstille metanol, som er en vigtig bestanddel i den kemiske industri. 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 fremtidens skibsbrændstof. I forhold til metanol har ammoniak den store fordel, at det med et molekyle, der alene

består af brint og kvælstof, ikke kræver grønt kulstof. Ammoniak har til gengæld den ulempe, at det er giftigt. På skibe arrangerer man derfor brændstofsyste­met med dobbeltrør, så lækager opdages af ammoniaksensorer, før der opstår risiko for forgiftning i maskinrummet.

Endelig kan grøn brint anvendes til energilagring. 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, produceres brint, og når der senere opstår mangel, kan brinten bruges til at generere strøm igen. Selve lagringen kan ske i gasform, for eksempel i gaslagre, eller i flydende form efter konvertering til ammoniak.

Konklusion

Produktionen af grøn brint er stadig begrænset, men mange lande har store planer. Danmark har med sine meget store vindressourcer 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.



Henrik Stiesdal er grundlægger af samt teknisk direktør for firmaet Stiesdal. Han byggede den første testvindmølle i 1976 og solgte licensen til et kommercielt design til Vestas i 1979, hvilket kick-startede den moderne vindindustri. Teknisk chef hos Bonus Energy fra 1988 og senere CTO for Siemens Wind Power 2004–2014. Installerede verdens første havvindmøllepark i 1991.

Kvants hjemmeside



Kvant har i løbet af året fået ny hjemmeside, idet den gamle efterhånden var meget ustabil og havde flere funktioner, som ikke længere fungerede. Hjemmesiden findes fortsat på adressen www.kvant.dk og er udviklet af Louise Kindt fra DTU Fysik og KU Matematik.

Louise Kindt er samtidig indtrådt i Kvants redaktion som digital redaktør, hvor hun bl.a. har arbejdet med

at gøre alle udgaverne af Kvant siden starten i 1990 tilgængelige på hjemmesiden kvant.medlemsbladet.dk. Der er fri adgang til alle udgaver bortset fra de numre, som er udkommet inden for det seneste år.

De nyeste numre kræver et medlemslogin, som vi arbejder på at etablere, og når det er klart, vil vi annoncere det på hjemmesiden www.kvant.dk. Allerede nu har medlemmer af DFS dog adgang med deres login til DFS.

I samarbejde med Det Kongelige Bibliotek arbejder vi desuden på at gøre Kvant tilgængeligt via hjemmesiden Tidsskrift.dk.

Perioden med en ustabil hjemmeside har desværre også betydet, at nogle mails sendt til kvant@kvant.dk ikke er nået frem. Så hvis du har henvendt dig på mailadressen, og der er gået usædvanlig lang tid uden svar, opfordres du til at sende mailen igen.