

# **Testcenter for brintteknologi**

## **Effektivitetstest ved produktion og anvendelse af brint**

Notat  
April 2022

**NOTAT**

## Testcenter for brintteknologi

*Niels Bjarne Rasmussen*

### Indhold

Effektivitetstest ved produktion og anvendelse af brint	2
Hvad skal måles?	2
Produktion af brint ved elektrolyse	3
Elektrolyseteknologier	3
Hydrogeneret vegetabilsk olie (HVO) / Fornybar diesel / Jetbrændstof	5
Metanol fra elektricitet	7
SNG fra metanisering af biogas	8
Katalytisk hydrolyse	10
Elektricitet til jet fuel	13
Grøn ammoniak	15
Lavtemperatur ”Proton Exchange Membrane Fuel Cell” (PEM-FC)	17
Lagring af brint	19
Fyldestationer til brint	20
Større industrier med forbrug eller produktion af brint	21

## Effektivitetstest ved produktion og anvendelse af brint

Arbejdet med udarbejdelsen af dette notat om effektivitetstest ved produktion og anvendelse af brint er betalt dels af gasselskabernes Teknologiske Service Program (TSP) og dels af projektet Testcenter for brintteknologi (GLDK, 2021-I, 64021-1005), begge i regi af Dansk Gasteknisk Center (DGC).

Formålet med notatet er at etablere en liste over de målinger, som skal foretages for at kunne beregne effektiviteten af forskellige brintteknologier.

Brintteknologier er i denne forbindelse teknologier, hvor der enten produceres eller anvendes brint til forskellige formål. Ved sådanne processer vil der altid ske et tab af energi i større eller mindre grad. Der ønskes etableret en liste for hver af teknologierne over de fysiske størrelser, som skal måles for at kunne beregne effektiviteten ved den enkelte teknologi. Listen vil formodentlig ikke være udtømmende, idet det i forbindelse med de praktiske målinger kan vise sig nødvendigt at foretage yderligere målinger, som ikke ved udarbejdelsen af dette notat var forudset.

De fleste af teknologierne i dette notat er beskrevet i Teknologikatalogerne fra Energistyrelsen ("Technology Data, Renewable fuels" og "Technology Data, Generation of Electricity and District Heating"), hvorfra en række figurer og tekster er kopieret.

### Hvad skal måles?

En række parametre skal måles for at kunne beregne effektiviteten af de enkelte teknologier. For hver af teknologierne er det ligeledes nødvendigt at definere, hvad man forstår ved effektivitet. Hvor skal man sætte grænsefladerne osv.

Generelt skal man kunne måle en række forskellige størrelser, fx:

- Temperaturer
- Tryk
- Tid
- Masseflow (eller volumenflow og densitet)
- Gassammensætninger (analyser)
- Brændselsanalyser
- Forbrug af elektricitet
- Produktion af elektricitet

## Produktion af brint ved elektrolyse

Elektrolyse som delproces indgår i en lang række processer, hvor H<sub>2</sub> er input og derfor skal produceres som en del af den samlede proces. Dette afsnit omhandler selve elektrolysen, og der vil i de følgende afsnit omhandlende andre teknologier blive henvist til dette afsnit, hvor det er relevant.

### Parametre, som skal måles

- Forbrug af el ind
- Forbrug af vand ind til elektrolyse
- Forbrug af energi ved rensning af vand (+ fordampning ved SOEC)
- Brint-flow ud
- Ilt-flow ud
- Kølevand (fluid) - flow
- Kølevand (fluid) – temperaturer
- Tryk i system og ved input/output
- Temperaturer i processen
- Brintrenhed + energi til rensning
- Tomgangstab ved elektrolyse
- Opstartstab ved elektrolyse
- Kompressorelforbrug ved lagring af brint
- Tab ved trykreduktion – udtræk af lager

### Elektrolyseteknologier

Der er tre grundliggende elektrolyseteknologier. Disse er ”Alkaline electrolysis cells” (AEC), ”Polymer electrolyte membrane electrolysis cells”(PEMEC) eller simplere (PEM) og endelig ”Solid oxide electrolysis cells” (SOEC). Teknologierne er ikke beskrevet nærmere, idet det ikke er en del af opgaven, og det er ikke nødvendigt for at identificere de nødvendige målinger til at beregne effektiviteter og tab.

På figurerne herunder ses principskitser af de tre elektrolyseteknologier, dels på celleniveau og dels på systemniveau.

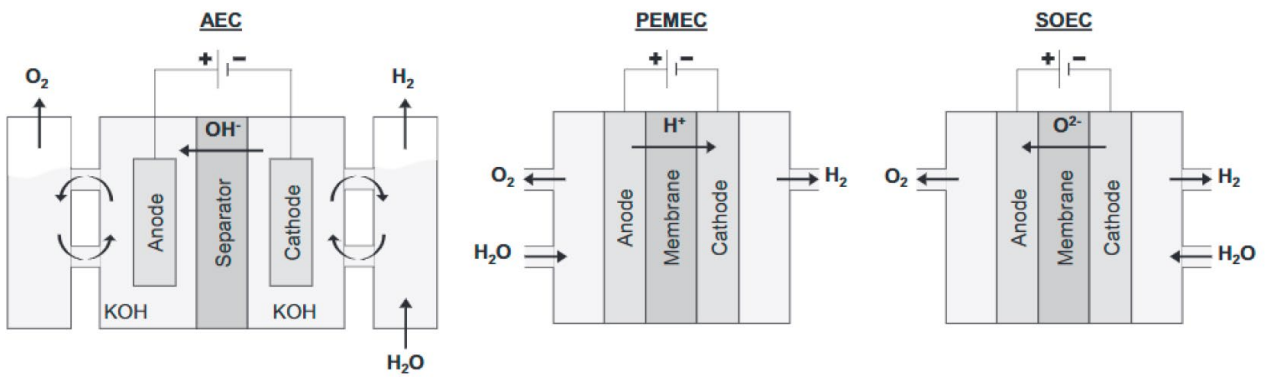


Figure 1: Operating principle of AEC, PEMEC and SOEC [1].

System description

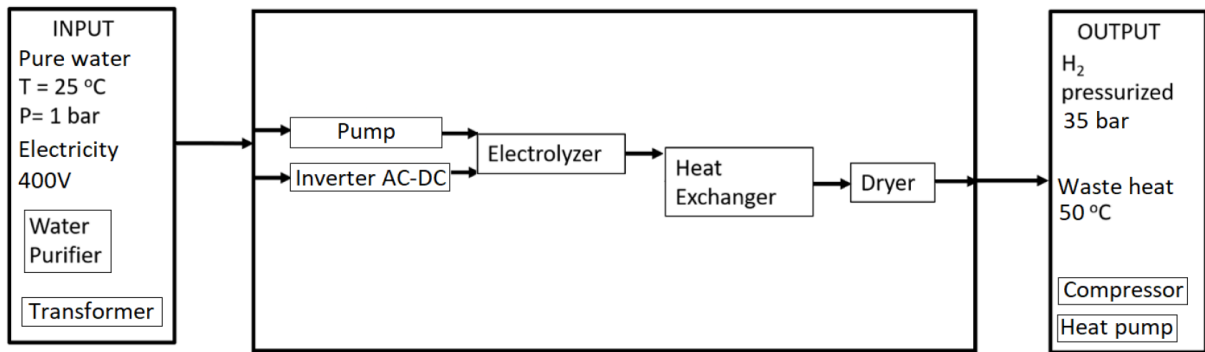


Figure 5: A sketch of an electrolysis system for AEC and PEM.

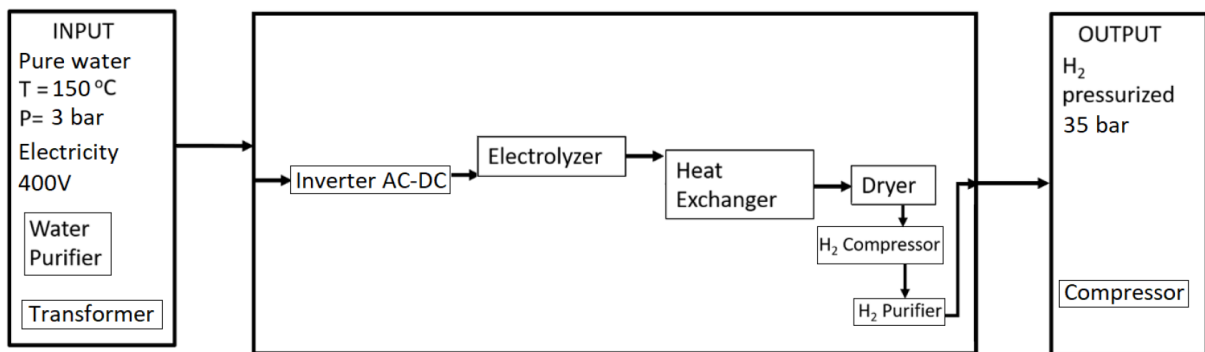


Figure 6: A sketch of an electrolysis system for SOEC.

## Hydrogeneret vegetabilsk olie (HVO) / Fornybar diesel / Jetbrændstof

HVO er kendt som fornybar diesel. Råvarerne er madolie og dyrefedt, som bringes til at reagere med brint i forbindelse med en katalysator under høj temperatur og højt tryk. Derved dannes en olie, som kan erstatte og er blandbar med fossil diesel. Desuden dannes mindre mængder af brændbare gasser og lettere olier.

Figuren herunder viser en principskitse af produktionsprocessen for HVO.

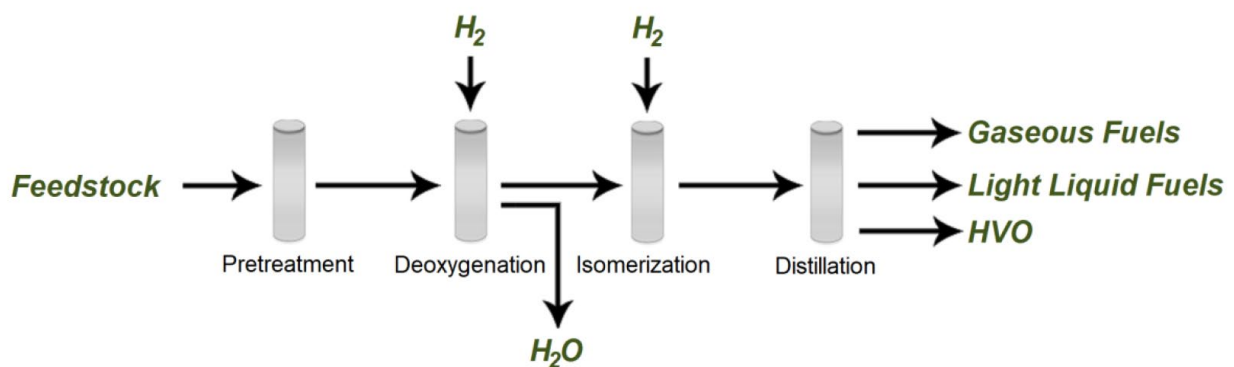


Figure 1 HVO Production Process

Ved produktion af jetbrændstof i stedet for fornybar diesel introduceres en "hydrocracking reactor" i processen. Input og output er imidlertid stort set de samme, og de nødvendige målinger for effektivitetstest vil være de samme.

Parametre, som skal måles

- Input: madolie, dyrefedt
- Brint ind
- Elektricitet ind
- Varme/naturgas ind
- HVO ud
- Lettere olier ud
- Gasformige brændsler ud
- Temperaturer
- Tryk
- Hvis elektrolyse er en del af processen: alle parametre fra "Elektrolyse"

Brintforbruget er lille i forhold til øvrige energistrømme. Nedenstående figur viser energistrømme for processen, som producerer HVO.

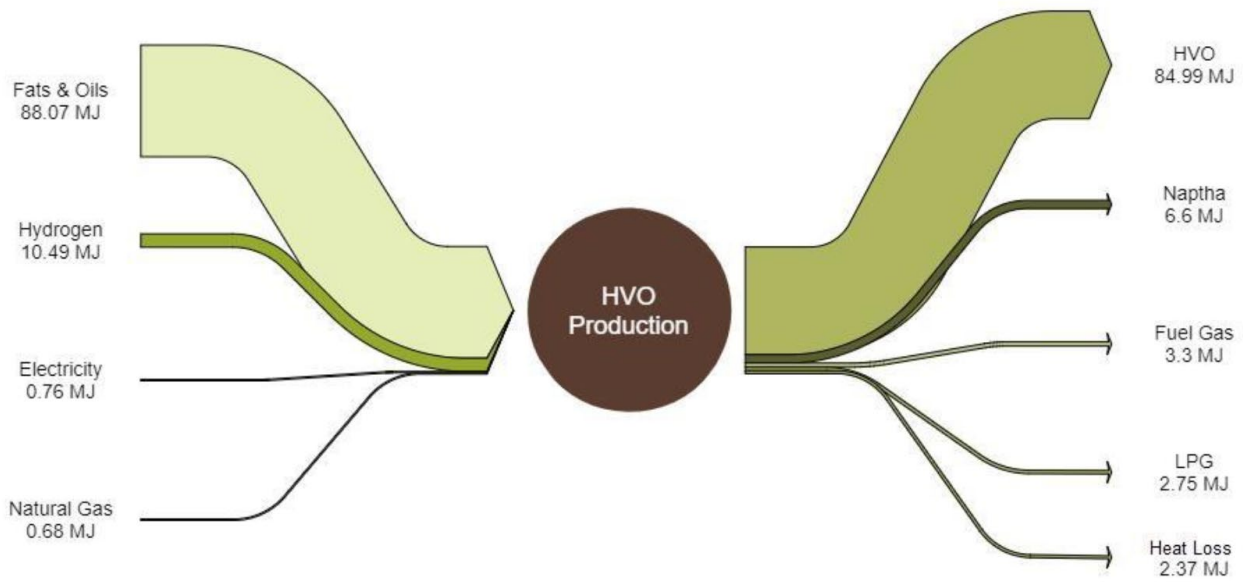


Figure 2 HVO Energy Balance

## Metanol fra elektricitet

Dette er en proces, som kombinerer CO<sub>2</sub> med brint produceret ved elektrolyse til produktion af metanol. Processen er i princippet en elektrolyseproces, hvor tilføjelsen af CO<sub>2</sub> som input muliggør en produktion af metanol ud fra brinten i efterfølgende procestrin. Processen foregår ved ca. 300 °C og et tryk på ca. 85 bar. Figuren herunder viser en principskitse af processen. Energibalancen ses i nedenstående Figur 2.

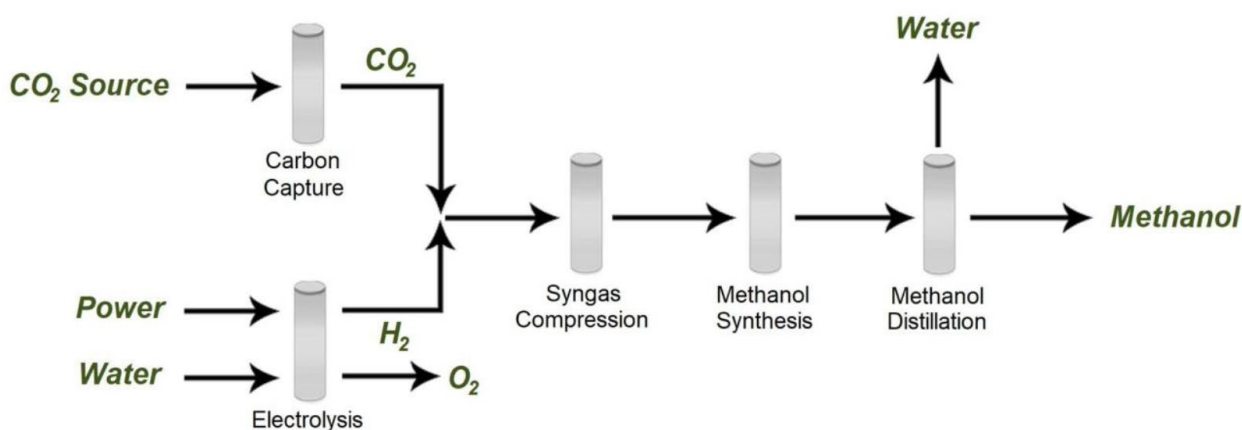


Figure 1 Methanol to Power Process

Parametre, som skal måles

- Forbrug af CO<sub>2</sub> ind
- Produktion af metanol ud
- Tryk
- Temperaturer
- Da elektrolyse er en del af processen: alle parametre fra ”Elektrolyse”



Figure 2 Methanol from Power Energy Balance



## SNG fra metanisering af biogas

SNG (Synthetic Natural Gas) er ”kunstig” naturgas og kan bl.a. produceres ved metanisering af den overskydende  $\text{CO}_2$  i biogas. Biogas består hovedsagelig af 50-65 % metan og resten  $\text{CO}_2$ . Ved at tilføje ekstra brint og metanisere blandingen kan andelen af  $\text{CO}_2$  i biogassen omdannes til metan. Energien til dannelse af dette ekstra metan kommer fra elektricitet, hvis brinten er dannet ved elektrolyse.

Metaniseringen kan foregå enten termokemisk eller ved biometanisering. Nedenstående Figur 1 viser en principskitse af biometan fra et biogasanlæg inklusive elektrolyse.

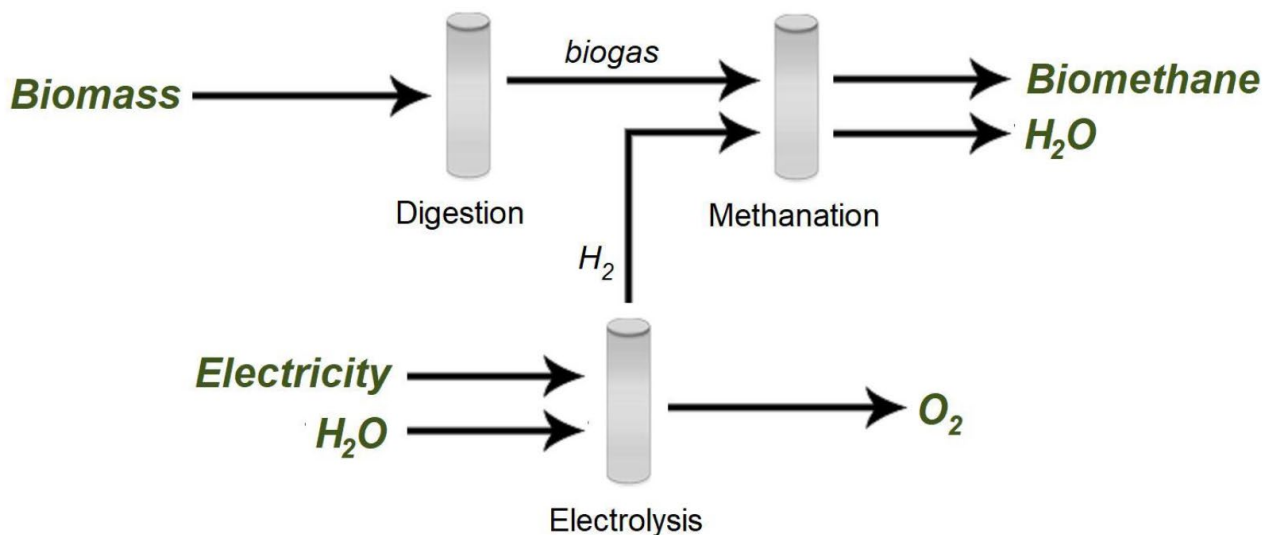


Figure 1 SNG Process

Parametre, som skal måles

- Hvis biomassen ønskes inkluderet i energibalancen, måles forbrug af biomasse ind
- Forbrug/produktion af biogas ind til metanisering
- Sammensætningen af biogas
- Produktion af biometan ud
- Tryk
- Temperaturer
- Da elektrolyse er en del af processen: alle parametre fra ”Elektrolyse”

Nedenstående Figur 2 viser energibalancen for fremstilling af SNG med udgangspunkt i et biogasanlæg som har 65 % metan i biogassen.

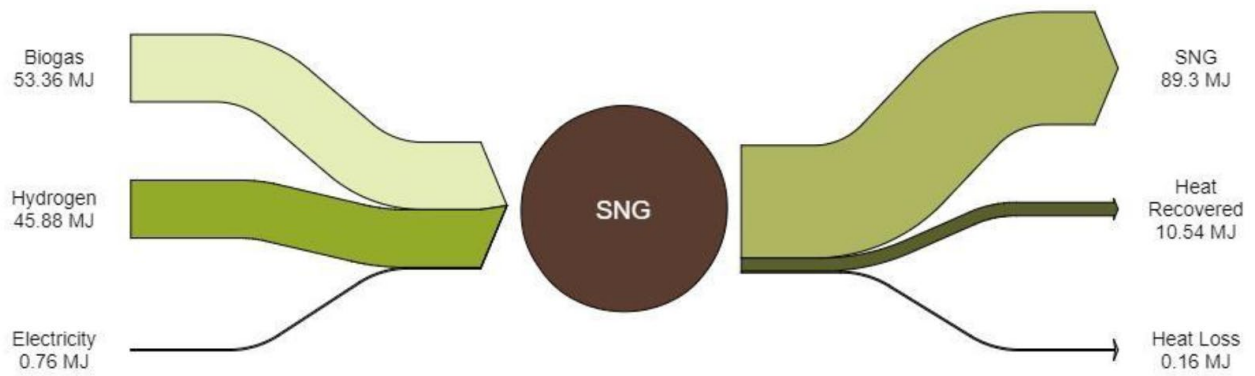


Figure 2 SNG Energy Balance

## Katalytisk hydropyrolyse

Katalytisk hydropyrolyse (CHyP) af biomasse er den termokemiske omdannelse af biomasse til bioolie eller flydende brændstoffer ved behandling med brint og en katalysator for at nedbryde den faste biomassestruktur til flydende, gasformige og faste komponenter. Typiske katalytiske hydropyrolyseprocesbetingelser er en temperatur på 375-475 °C og driftstryk fra 10 til 30 bar. Det grundlæggende procesflow er vist i den følgende Figur 1.

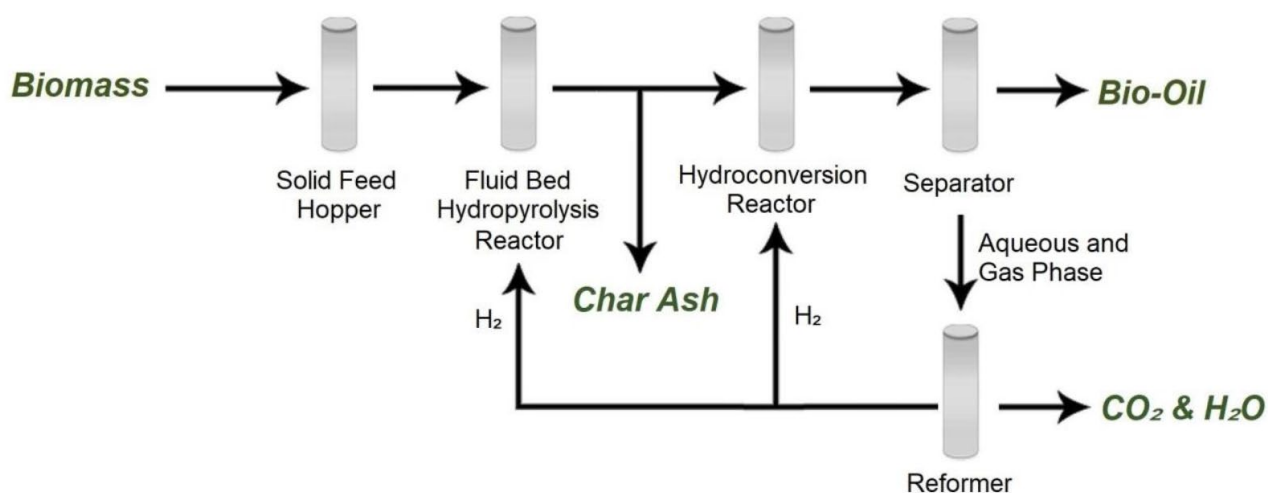


Figure 1: Catalytic Hydrolysis Process Flow

Processens input er biomasse, brint og en katalysator. Der kræves noget elektricitet for at drive processen. I nogle konfigurationer, herunder den, der er tættest på kommercialisering, kan brinten fremstilles internt ved hjælp af den producerede gas og kul.

Det energiholdige output fra systemet kan være organiske væsker (bioolie), biokul, gas og varme. Gassen kan være en kilde til CO<sub>2</sub> for metanisering til SNG-produktion. Der produceres også vand af systemet.

Den bio-olie, der produceres i den første reaktor, vil stadig have noget ilt i sig, dog i reducerede niveauer sammenlignet med den hurtige pyrolyseproces. Den vil have begrænset blandbarhed med olieprodukter og vil kræve yderligere behandling til mange anvendelser. Systemer med den sekundære hydrobehandling kan producere kulbrinter i benzin- og dieselbrændstofområdet.

### Parametre, som skal måles

- Hvis biomassen ønskes inkluderet i energibalancen, måles forbrug af biomasse ind
- Tryk
- Temperaturer
- Bio-olie ud
- Bio-char ud
- Gas ud
- Eventuelt benzin og diesel ud
- Varme ud
- Hvis elektrolyse er en del af processen: alle parametre fra "Elektrolyse"

Energibalancen for katalytisk hydroprocessing er vist i følgende Figur 2. Disse data er baseret på en laboratorieundersøgelse, der undersøgte temperatur og tryks indvirkning på distributionen af produkter. Den katalytiske hydroprolyse blev foretaget i en fluid bed-reaktor med en koboltmolybdænkatalysator, efterfulgt af dyb hydrodeoxygenering ved anvendelse af en nikkelmolybdænkatalysator i hydrokonverteringsreaktoren.

Da dette er baseret på et eksperimentelt system, er det ikke fuldt optimeret, og kul, gas og overskudsvarme vises som produkter.

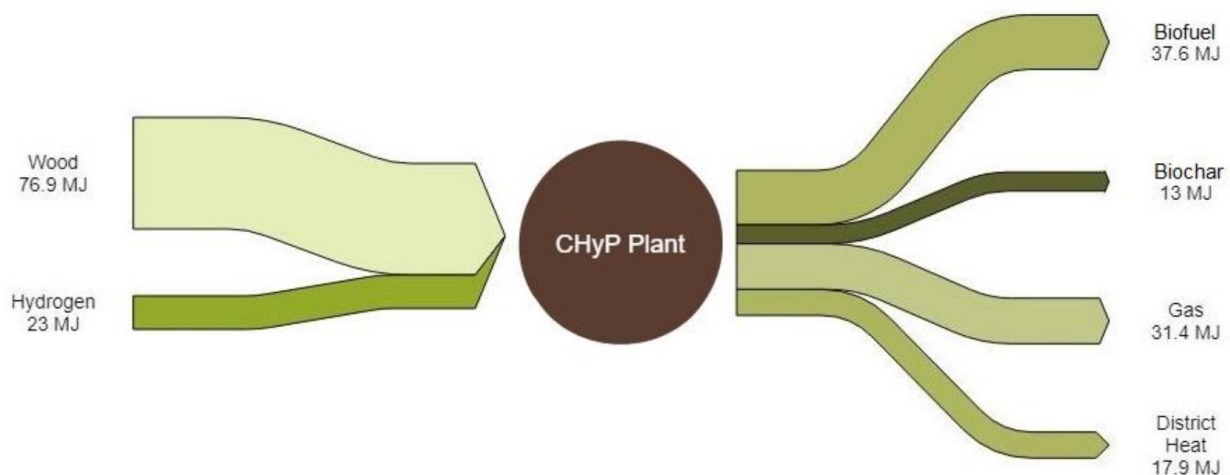


Figure 2: Catalytic Hydroprolysis Energy Balance – Configuration 1

En anden version af processens energibalancen er vist i den følgende Figur 3. Denne energibalancen er baseret på vedvarende benzin og diesel produceret ved den integrerede hydroprolyse- og

hydrokonverteringsproces (IH2) på et eksisterende olieraffinaderi i USA. Denne proces er blevet optimeret til at producere flydende produkter, og den udnytter al kul og gas til at levere energi- og brintbehovet til processen. Det er denne proces, der har fået størst opmærksomhed i litteraturen og der er offentliggjort teknøkonomiske vurderinger heraf.

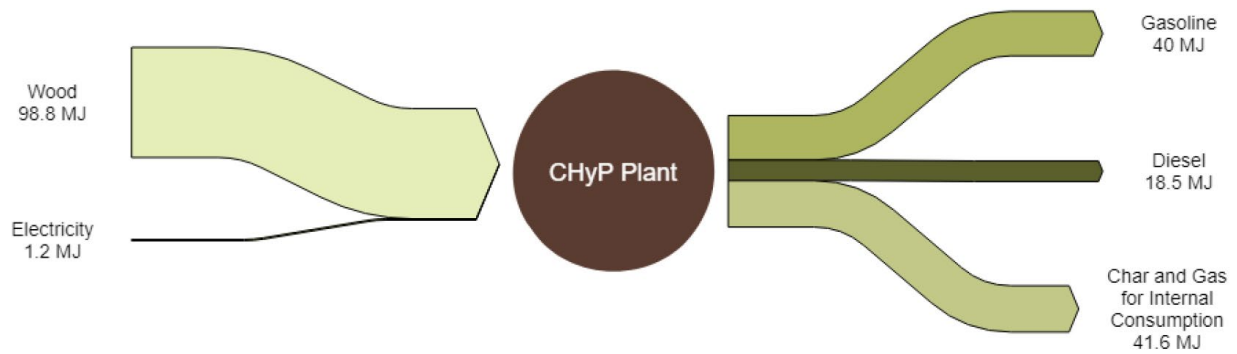


Figure 3: Catalytic Hydropyrolysis Energy Balance – Configuration 2

## Elektricitet til jet fuel

Elektricitet bruges til at lave brint via elektrolyse, og kuldioxid reduceres til kulilte og vand. De to strømme kombineres for at producere en syntesegas, som derefter syntetiseres gennem Fischer-Tropsch-reaktionerne for at producere flydende kulbrinter og varme. Det grundlæggende procesflow er vist i følgende Figur 1.

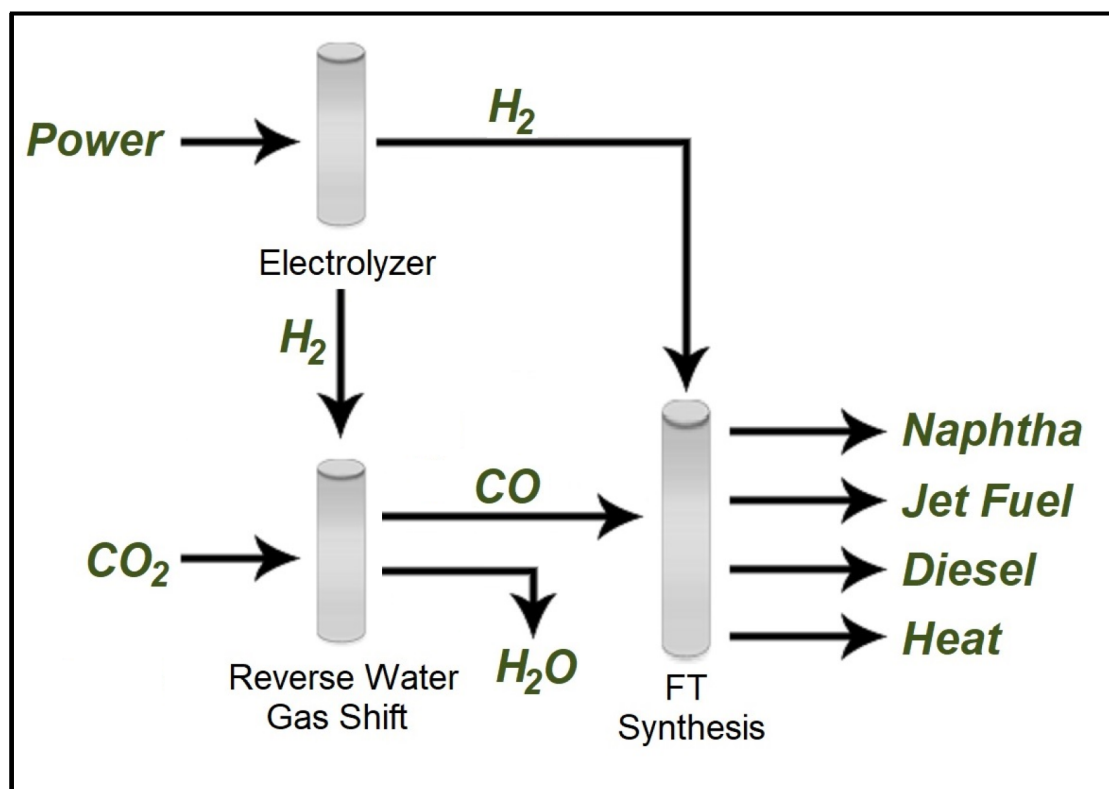


Figure 1: Power to Jet Process Flow

Vandet fra det omvendte ”Water-gas-shift” (RWGS) kan recirkuleres tilbage til elektrolysatoren til brintproduktion. Der er en række katalysatorer, der kan bruges til Fischer-Tropsch-syntesen, men jern- og koboltbaserede katalysatorer er de mest almindelige. Jernkatalysatorerne arbejder typisk i et temperaturområde på 300 til 350 °C, og koboltkatalysatorerne arbejder ved lavere temperaturer (200 til 240 °C), og begge arbejder ved tryk på 20 til 25 bar.

Udfordringen med denne teknologi vil være, at tilgængeligheden af den vedvarende elektricitet sandsynligvis vil være intermitterende, og da brændstofsyntesedelen af processen foretrækker at arbejde med en konstant hastighed, vil der være et krav om brintlagring for at muliggøre drift, når strømmen er ikke tilgængelig til at producere brinten. Brintlagring vil øge kapitalomkostningerne. Opbevaring af kuldioxid kan også være påkrævet afhængigt af forsyningskildens stabilitet.

### Parametre, som skal måles

- Da elektrolyse er en del af processen: alle parametre fra ”Elektrolyse”
- Tryk
- Temperaturer
- Forbrug af CO<sub>2</sub> ind
- Naphta ud
- Jet fuel ud
- Diesel ud
- Varme ud
- Energitalb ved eventuel lagring af brint og CO<sub>2</sub>
- Energi til at opfange og koncentrere CO<sub>2</sub>

Den teknologi, der er tættest på at være kommercielt tilgængelig i en rimelig skala, er brugen af et alkalisk elektrolysesystem og den omvendte Water-gas-shift-reaktion. Den estimerede energibalance for dette system er vist i følgende Figur 2. Kuldioxid indeholder ingen energi, men afhængigt af kilden til CO<sub>2</sub> kan der være brugt noget energi på at opfange og koncentrere CO<sub>2</sub>.

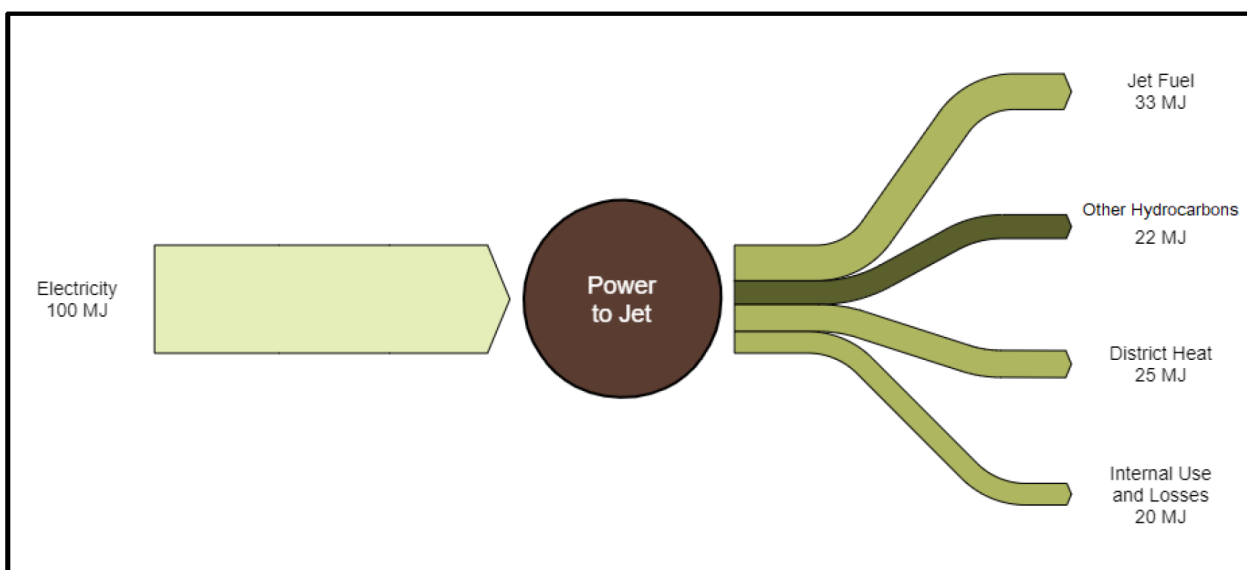


Figure 2: Power to Jet Fuel Energy Balance 2050 Projection

## Grøn ammoniak

I dag er næsten al industriel produktion af ammoniak baseret på Haber-Bosch-processen, hvor elementært nitrogen og brint kombineres ved hjælp af en katalysator under højt tryk og høj temperatur. Hvor nitrogen kan genvindes fra den omgivende luft, produceres brinten overvejende ved dampreformerering af naturgas (metan), en proces, der resulterer i store udledninger af fossil CO<sub>2</sub>. Reduktion af CO<sub>2</sub>-emissionerne fra ammoniakproduktion er således stærkt forbundet med reduktion af emissioner fra brintproduktion. Dette kan opnås ved at opsamle og lagre CO<sub>2</sub> fra konventionel brintproduktion eller alternativt erstatte den konventionelle produktion af brint med grøn brint fra elektrolyse baseret på vedvarende energi.

Grøn ammoniak omfatter elektrolyse til H<sub>2</sub>-produktion, luftseparationsenhed ("Air separation unit", ASU) til nitrogenproduktion og ammoniaksyntese (se lysegrøn boks i Figur 1).

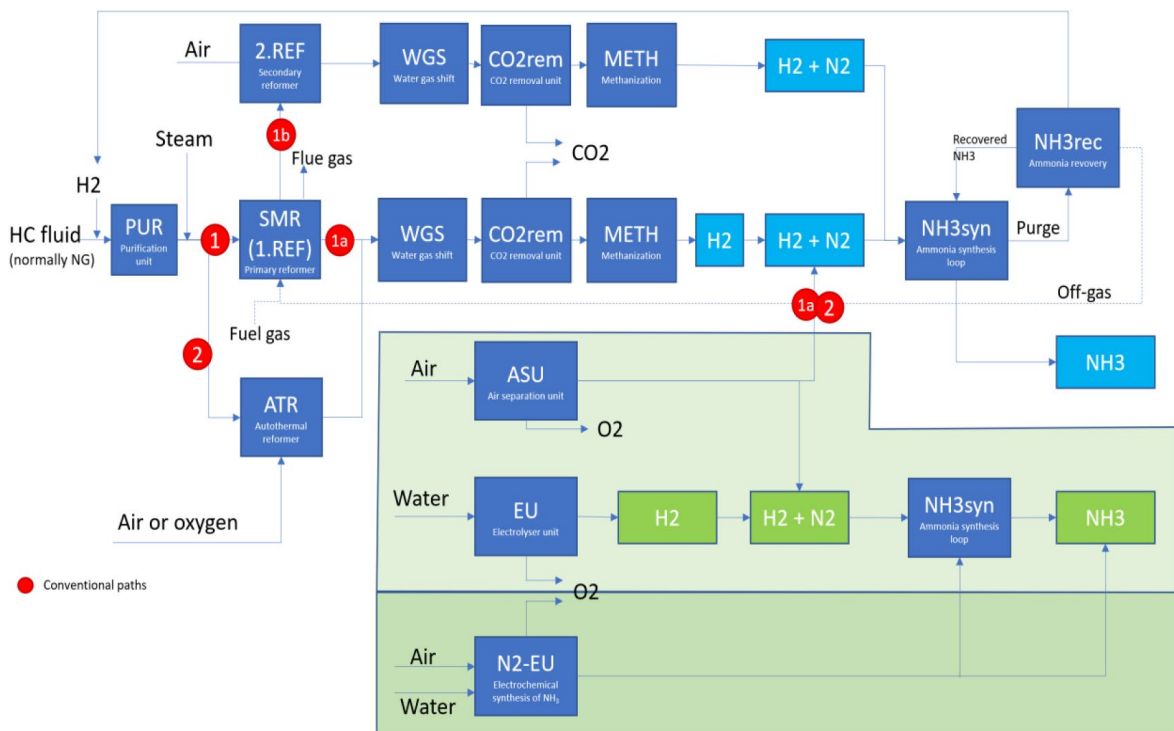


Figure 1: Different pathways for production of NH<sub>3</sub>. The light green area is the green NH<sub>3</sub> production part that is covered within this Technology Catalogue. The darker green area marks a potential future route (electrochemical). The white background shows the three conventional parts, i.e. 1a) SMR+ASU, 1b) SMR+2.REF and 2) ATR+ASU.

Ammoniaksyntesen fungerer bedst ved et højt driftstryk. Afhængigt af teknologiudbyderen kører processen normalt på alt mellem 150 og 250 barg. Et almindeligt samlet procestrykfald er ca. 10 bar. Temperaturer i processen spænder fra 350 °C til 550 °C.



Kold nedlukning bør generelt kun bruges til vedligeholdelse. Det bør ikke bruges til et kort stop af anlægget på grund af manglende produktefterspørgsel eller manglende tilgængelighed af råstoffer. Årsagen er, at hyppig afkøling og genopvarmning vil forårsage katalysatorsammenfald (på grund af slibning blandt katalysatorpartikler forårsaget af ekspansion ved opvarmning og krympning ved afkøling) og derved reduceret katalysatorlevetid. Derfor skal et ammoniakanlæg holdes i varm standby-tilstand i perioder, hvor det ikke er i drift.

#### Parametre, som skal måles

- Da elektrolyse er en del af processen: alle parametre fra ”Elektrolyse”
- Tryk
- Temperaturer
- Forbrug af luft ind
- Elektricitet til ASU
- Varme ud
- Ammoniak ud (energi og renhed)
- Energitab ved eventuel lagring af brint og ammoniak
- Energitab ved standby-tilstand

## Lavtemperatur "Proton Exchange Membrane Fuel Cell" (PEM-FC)

Brændselsceller er elektrokemiske enheder, der omdanner brændstof til elektricitet og varme. Generelt er konverteringseffektiviteten fra brændstof til elektricitet høj i en brændselscelle, og teknologien er skalerbar uden tab af effektivitet. PEM-brændselscellen består af en katode og en anode lavet af grafit og en protonledende polymer som elektrolytten som vist i følgende Figur 1.

Lavtemperatur PEM-brændselsceller fungerer ved temperaturer under 100 °C (typisk omkring 80 °C), da membranen skal være mættet af vand.

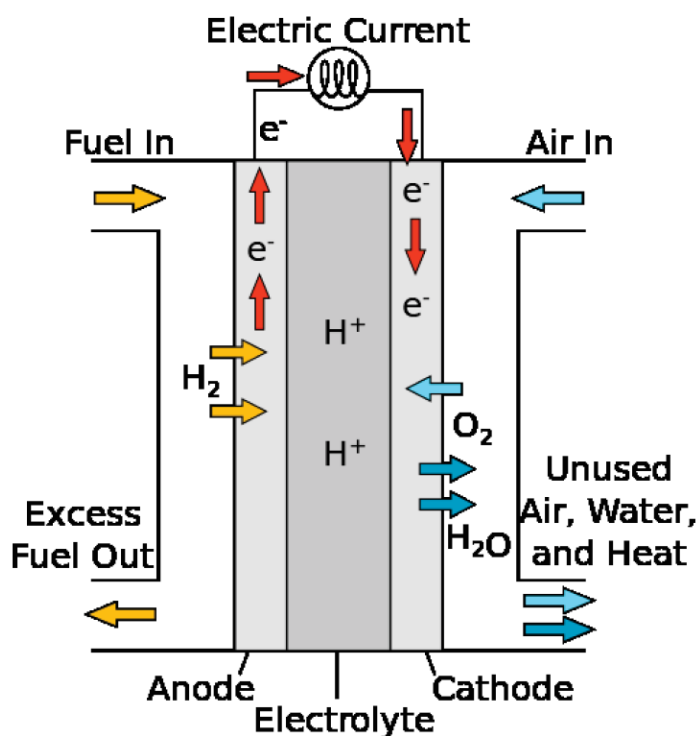


Figure 1: Diagram of a PEM-FC [2].

Ved produktion af kraftvarme fra en brændselscelle (PEM-FC) baseret på brint skal en række parametre måles for at beregne effektiviteten.

Parametre, som skal måles

- Brintmængde ind
- Forbrug af luft ind
- Brinttab ved processen
- El ud

- Temperaturer
- Varme ud
- Kølevand (fluid) - flow
- Kølevand (fluid) – temperaturer

## Lagring af brint

Forskellige lagersystemer kan anvendes ved lagring af brint. Lagermulighederne kan deles op i to væsentligt forskellige teknologier, nemlig lagring over jord og lagring i underjordiske lagre.

Ved overjordiske lagre, som anvendes ved relativt små lagre, kan forskellige tankanlæg benyttes.

Underjordiske lagre er kostbare ved etableringen og kræver store lagerstørrelser for at være rentable. I Danmark kan saltkaverne fx anvendes til underjordiske lagre.

### Parametre, som skal måles

- Brintmængde ind
- Brinttab ved fyldning af lager
- Elforbrug til kompressor ved lagringen
- Tab ved tryksækning ved udtag (inkl. eventuel opvarmning)
- Varme ud ved udnyttelse af kompressorkølevand
- Eventuel expanderenergi (udnyttelse af trykreduktion)
- Kølevand (fluid) - flow
- Kølevand (fluid) – temperaturer

Tab beregnes som tabte og brugte kWh/kWh<sub>H2</sub> lagret.

## Fyldestationer til brint

Fyldestationer til brint kan have tab både ved fyldningen af lageret og ved tankningen af det køretøj, som skal have leveret brint fra lageret.

### Parametre, som skal måles

- Brintmængde ind
- Brinttab ved fyldning af lager
- Elforbrug til kompressor ved lagringen
- Brinttab (lækage) ved tankning fra lageret
- Tab ved tryksænkning ved udtag (inkl. eventuel opvarmning)

Tab beregnes som tabte og brugte kWh/kWh<sub>H2</sub> lagret.

## Større industrier med forbrug eller produktion af brint

Der er forskellige industrier, som på den ene eller anden måde kan have berøring med brint.

- Industri, som bruger brint i produktionen
- Industri, som har en stor CO<sub>2</sub> emission, og som derfor kan være leverandør af CO<sub>2</sub> til fuel-fremstilling i kombination med brint fra elektrolyse.

Industrier, som forbruger brint, kan enten vælge elektrolyse eller køb af brint fra brintnet og eventuelt lagring i lagertank.

### Parametre, som skal måles

- Hvis elektrolyse er en del af processen: alle parametre fra "Elektrolyse"
- Brintmængde ind
- Brinttab ved fyldning af eventuelt lager
- Elforbrug til kompressor ved lagringen
- Brinttab (lækage) ved tankning fra lageret
- Tab ved tryksænkning ved udtag (inkl. eventuel opvarmning)