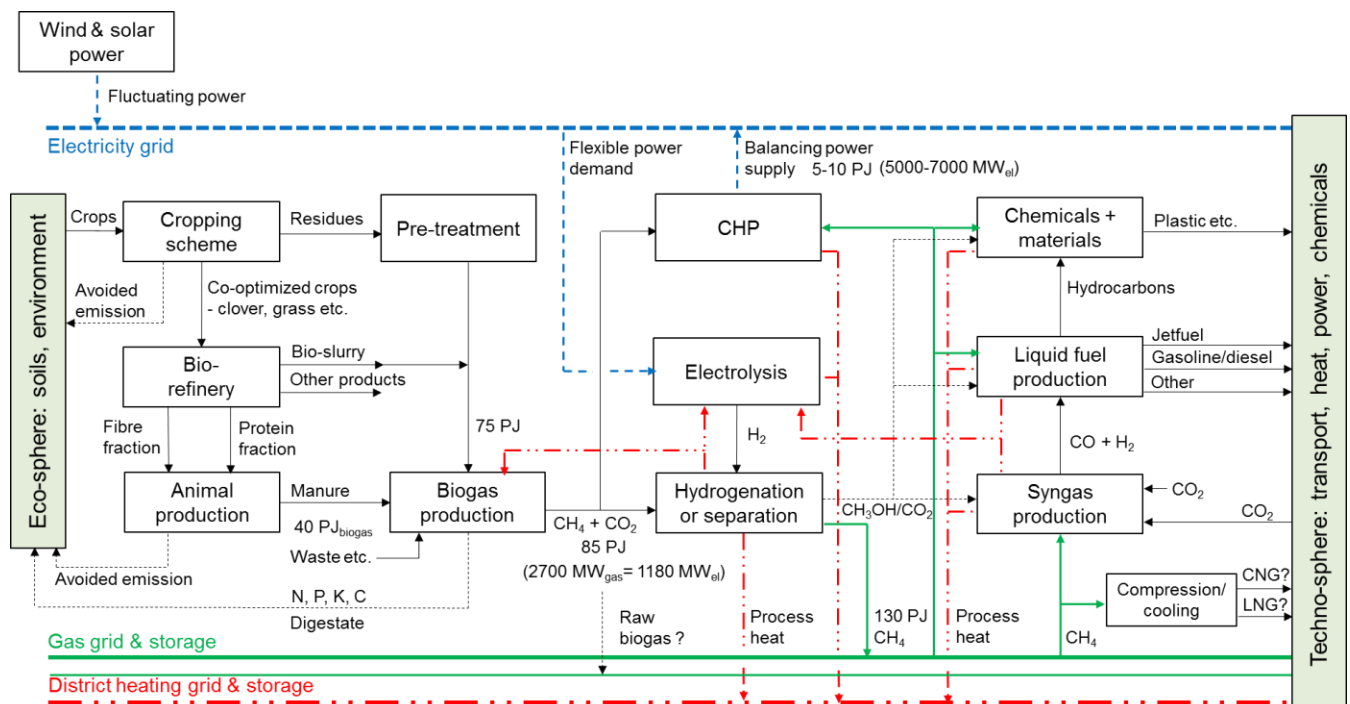


Vision for en bio-methan og elektro-methan platform for fremtidens kulbrinteforsyning

Henrik Wenzel, Anders Winther Mortensen, Kasper Dalgas Rasmussen, Lars Yde, Abid Rabbani
Syddansk Universitet, SDU Life Cycle Engineering



SDU Life Cycle Engineering, www.sdu.dk/lifecycle
Campusvej 55, 5230 Odense M
ISBN: 978-87-93413-15-3
EAN 9788793413153
13. september 2019

Indhold

1. Forord	3
2. Introduktion.....	4
2.1 Klodens biomassekapacitet i forhold til en fossilfri økonomi	4
2.2 Kulstof er flaskehalsen – ikke energi	4
2.3 Energisystemets behov for biomasse.....	5
3. Succes kriterier for fremtidens bioenergi og kulbrinteforsyning	7
4. Vision for en bio-økonomisk platform for fremtidens kulbrinteforsyning.....	9
4.1 Biogas og integration med landbruget	10
4.2 Biogas og integration med el, varme og transport systemet	11
4.3 Videre konvertering til længere kulbrinter.....	12
5. Økonomi og forretningsmodeller	13
6. Visionens danske styrkepositioner	14
7. Konklusion	14
8. Referencer	16

1. Forord

Dette notat er en introduktion til en vision og et scenarie for fremtidens kulbrinteforsyning i et vedvarende energisystem. Scenariet repræsenterer en vej til kulbrinteforsyning i en overvejende fossil fri verden, hvor el-, varme/køling- og transportsektorerne er forsynet med vedvarende energi, og hvor kemikalie- og materialeforsyning også overvejende bygger på vedvarende ressourcer og –energi. I en verden med disse rammevilkår ser vi scenariet som et attraktivt og konkurrencedygtigt scenarie af grunde, som vil blive beskrevet. Visionen er således ment som et sandsynligt og attraktivt scenarie, men ikke som eneste mulige vej til kulbrinteforsyning. Der er flere andre veje, som kan spille en større eller mindre rolle, og visionen er ikke tænkt at være udtømmende eller ekskluderende. Men den vurderes at være attraktiv og konkurrencedygtig på så mange områder, at det vil være fornuftigt at holde andre veje til kulbrinteforsyning op imod den og drøfte de indbyrdes fordele og ulemper, når det skal vurderes, hvor forskellige teknologiers indbyrdes styrker og svagheder og anvendelsesområder ligger.

Fredag 13. september 2019



Henrik Wenzel

2. Introduktion

2.1 Klodens biomassekapacitet i forhold til en fossilfri økonomi

Hvis de globale drivhusgasudledninger fortsætter som hidtil, forventes det, at vi i 2026 overstiger den udledning, der efterfølgende fører til 1½ grads stigning, og i 2037 overskrides den udledning, der efterfølgende fører til 2 graders stigning baseret på tal fra IPCC¹ og CDIAC^{2,3}. Der er således begrænset tid at handle i, hvis Parisaftalens mål om at holde en temperaturstigning under 2 °C skal nås, og det er store mængder alternative kilder til brændstoffer og plast, der skal findes for at erstatte de fossile brændsler.

Biobrændsler og bioplast nævnes ofte som alternativer til de fossile brændsler og fossil plast, men det er nødvendigt at se på skala og proportioner i en fortrængning af fossile brændsler, når det diskuteres hvilke produkter og services, som biomassen skal være råvare for. I dag anvendes fossile brændsler på globalt omkring 500 EJ/år, og det globale forbrug forventes samtidig at stige markant på grund af både befolkningstilvækst og velstandsstigning. Om 10-15 år forventes vi at være 3,5 milliarder flere i middelklassen, der samlet har et langt større forbrug og herunder efterspørger langt mere kød i fødevarer sammensætningen end i dag, og omkring 2050 forventes plastproduktionen at være næsten firdoblet og flytransport og skibstransport næsten fordoblet.

Den seneste konsensus om det fremtidige globale biomasse potentiale, fra en IPCC ekspertgruppe om bioenergi, er 100 – 300 EJ/år⁴, og det er en størrelsesorden, som efterfølgende bekræftes af mange andre forskere, og konsensus om dette er stærk^{5,6}. Det Internationale Energiagentur, IEA har senest udgivet en rapport, hvor potentialet vurderes at ligge omkring 150 EJ/år⁷.

Hvis strategien for udfasning af fossile brændsler indebærer bioplast, biostål (ved brug af bio-koks), biocement (ditto), biobrændsler til fly og skibe og lastbiler og sågar personbiler, og flis og træpiller til el, varme – kan det samlede biomassebehov estimeres til at være ca. 1000 EJ/år i 2050. Hvad angår de materialer som fylder mest i verden (plast, stål og cement) peger fremskrivning mod 2050 på, at forbruget af energi til produktion af disse materialegrupper alene op mod 200 EJ/år. Plastforbruget forventes at stige radikalt fra 335 Mt/år i 2016 til 1,2 Gt i 2050⁸, og hvis dette skal fremstilles som bioplast, vil det indebære et biomassebehov på over 120 EJ/år. Hvis vi ikke søger andre veje end almindelig bioplast til dette, så kommer plasten alene til at stå for størstedelen af den biomasse, verden maksimalt råder over.

2.2 Kulstof er flaskehalsen – ikke energi

Energiindholdet i det solly, der rammer jorden, svarer til omkring 6000 gange mere end den mængde energi, der er brug for. Så energi er der derfor nok af. Det er vores behov for kulbrinter og andre kulstofforbindelser, der er flaskehalsen i vores system og herunder kulstof som råvare. Udfordringen er derfor 1) at fange energien og 2) konvertere den til kulbrinter. Planter opsamler energien i sollyset ved fotosyntese, der under danske himmelstrøg fanger 0,5-1 W/m² set over året, mens solceller i Danmark fanger 15-20 W/m² – i laboratoriet er der målt op mod 80 W/m². Solceller kræver altså 20-40 gange mindre areal end planter pr. energienhed for at fange sollyset. Vindmøller er endnu mere effektive pr. arealenhed, hvis man kun regner tårnets arealforbrug med – og off-shore møller optager ingen landjord.

Ved konvertering af biomasse til kulbrinter sker der oftest et tab af biomasse, dels fordi dele af biomassen er vanskelig at omsætte til kulbrinter i mange konverteringsprocesser, dels fordi mange mikrobielle processer også opbygger celledmasse i mikroorganismene og har andre stofskifteprodukter end det tilsigtede. Derfor skal der bruges flere energienheder fra biomasse pr. enhed kulbrinte, end hvis råvaren er fossil. Men særligt har methan-plattformen (brug af biometan og elektrometan som udgangspunkt/råvare for videre fremstilling af plast og brændstoffer) en meget effektiv konvertering, og der tabes ikke kulstof – i biogas efterfulgt af methanisering omsættes al den kulstof, der fjernes fra marken, til kulbrinte. Der er et

vist energitab, men det kommer fra vind og kan i Danmark næsten fuldstændigt nyttiggøres til varme, så det bidrager til bestræbelserne på at få vindkraft (eller solkraft) ind i varmesektoren.

Med det udgangspunkt er det værd at diskutere perspektivet i bio-methan og elektro-methan (fremstillet ud fra CO₂ og brint) som udgangspunkt for fremtidige produkter og services, herunder polymerer. Der er grundlæggende tre kilder til ikke-fossilt kulstof, og det er biomasse, CO₂ og genanvendt kulstof fra teknosfæren, fx plast⁹. Det er afgørende, at disse kilder prioriteres rigtigt i en samlet optimering, at udledninger til atmosfæren reduceres mest muligt, og at brugen af biomassen begrænses til det bæredygtige potentiale.

Det er sandsynligt, at de konventionelle bioplasttyper og biobrændsler er en blindgyde, fordi de indebærer en for ineffektiv anvendelse af biomassen. Det er derfor vigtigt, at der er opmærksomhed på dette, så en fokus på holdbare løsninger ikke forsinkes.

For plastens vedkommende er det væsentligt at skelne mellem 1) bulk plast og 2) de mængdemæssigt mindre væsentlige plasttyper, hvor volumen er lille og ønsker til plastens egenskaber kan begrunde anvendelsen af bioplast. Særligt i forhold til bulk plast kan det være relevant at vurdere CO₂ og brint som udgangspunkt.

2.3 Energisystemets behov for biomasse

Danmark er det land i verden, der grundigst har analyseret mulighederne for fremtidens vedvarende energisystem, og der er lavet et stort antal analyser og scenarier gennem de sidste godt 10 år, se tabel 1.

Studie	Reference
IDAs energiplan 2030	IDA (2006) ¹⁰
IDAs klima plan 2050	IDA (2009) ¹¹
IDAs Energi Vision 2050	IDA (2015) ¹²
Grøn energi – vejen mod et dansk energisystem uden fossile brændsler	Klimakommissionen (2010) ¹³
Coherent Energy and Environmental System Analysis (CEEESA)	AAU m.fl. (2011) ¹⁴
Energiscenarier mod 2020, 2035, and 2050	Energistyrelsen (2014) ¹⁵
Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system	SDU og COWI (2014) ¹⁶
Energi 2050 – et udviklingsspor for energisystemet	Energinet (2010) ¹⁷
Energikoncept 2030	Energinet (2015) ¹⁸
Systemperspektiv 2035	Energinet (2018) ¹⁹

Tabel 1. De væsentligste analyser og scenarier for Danmarks vedvarende energisystem gennem det sidste årti

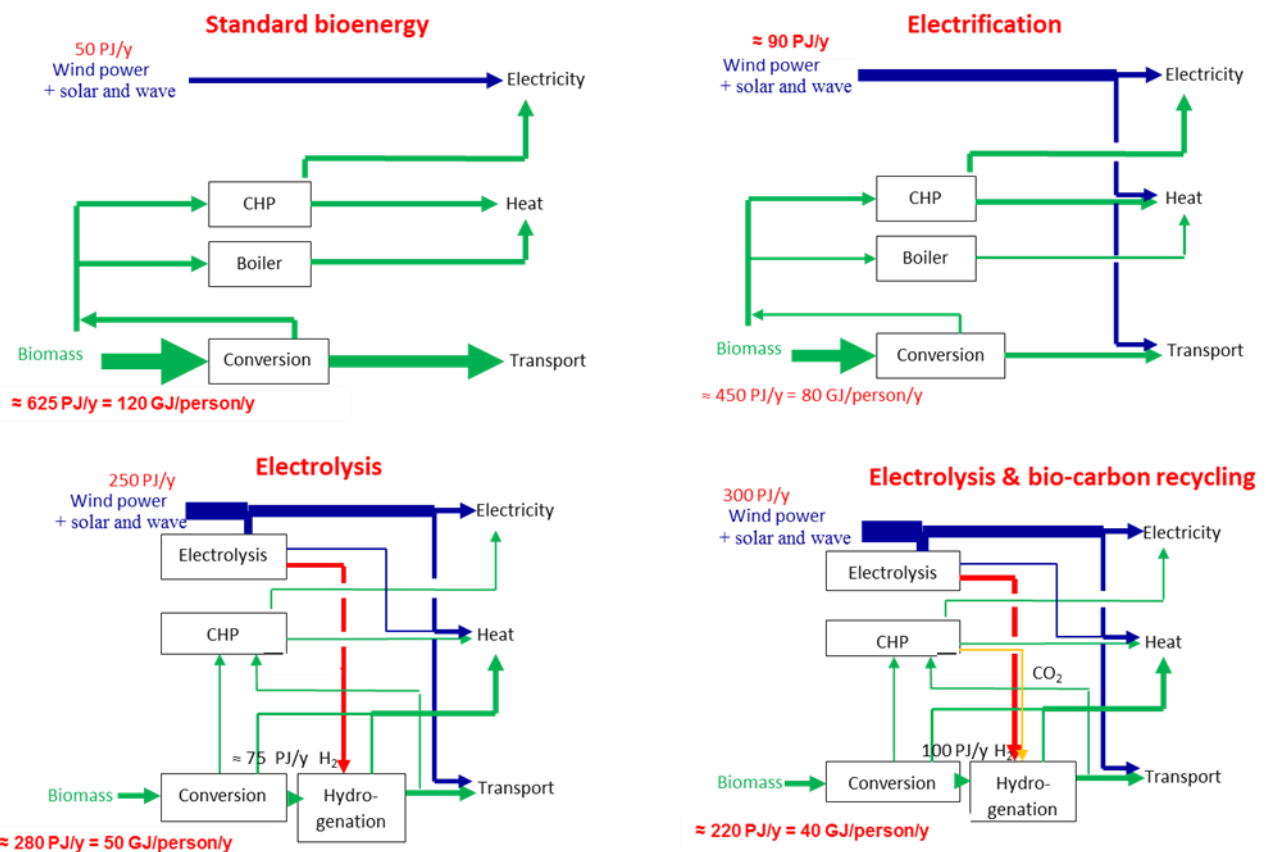
Vi har analyseret og sammenlignet studierne og de varianter af scenarier, de indeholder. Det viser sig, at alle studier og scenarier gør brug af tre overordnede principper for at opnå et fuldt vedvarende energisystem i forskellig grad og i forskellige kombinationer:

- Bioenergi
- Elektrificering (af transport og varme)
- Elektrolyse og integration af brint til transportbrændstof

I scenarier med elektrolyse indgår den producerede brint i næsten alle scenarier i fremstilling af kulbrinter ved reaktion med den kulstof, der er i biomasse eller i CO₂ udvundet fra emissioner (biogas, røggas og lign.) eller fra atmosfæren. De fleste studier omfatter flere scenarier for et fuldt vedvarende energisystem, og typisk spænder de fra scenarier med overvejende bioenergi som erstatning for de fossile brændsler uden

væsentlig elektrificering, over scenarier med stor elektrificering og til de mest avancerede scenarier med elektrolyse og udvinding af CO₂ fra emissioner eller atmosfæren.

Vi har ud fra en analyse af alle scenarier søgt at opstille en enkel model for, hvad de anvendte design-principper for energisystemet betyder for energisystemets træk på biomasse og el fra vind og sol samt deres integration af brint. Dette er vist i Figur 1. Figuren viser tendensen for betydningen af elektrificering og brint, men den skal ikke forstås entydigt, for det kan eksempelvis være muligt at opnå endnu højere grad af elektrificering, end modellen her har antaget, og således opnå lavere forbrug af biomasse og højere integration af vind uden så store mængder brint, som figuren viser. Men tendensen er rigtig – med mere brint og med anvendelse af CO₂ som supplerende kulstofkilde kan systemet naturligvis dække efterspørgslerne efter el, varme og transport med højere integration af el og lavere forbrug af biomasse. Energinet har senest i sit studie fra 2018 designet et system med kun 40 PJ brint/år og et biomasse forbrug på 200 PJ/år¹⁹, hvor det lavere behov for brint sker under antagelse af meget høj grad af elektrificering samt relativt stor el-samhandel med omkringliggende lande.



Figur 1. Det vedvarende energisystems biomassebehov ved forskellige system design filosofier: 1) ren bioenergi, 2) elektrificering af transport og varme, 3) elektrolyse og brint reageret med biokulstof, 4) elektrolyse og brint reageret med biokulstof & punktkilde CO₂ emission

Ved også at anvende CO₂ fra atmosfæren²⁰⁻²⁵ kan vind- og brint integrationen blive endnu højere, og det er principielt muligt at udvikle et system helt uden brug af biomasse, men kun forsynet via elektrobrændstoffer fremstillet af CO₂ og brint.

De her opstillede modeller er principskitser, men de bygger på grundige analyser i de refererede studier, og de lader sig alle realisere med eksisterende teknologi. Også fremstilling af elektrobrændstoffer fra CO₂ og brint lader sig umiddelbart gøre med velafprøvet eksisterende teknologi til elektrolyse^{26–28} og til videre konvertering af fx metan til flydende kulbrinter og polymerer^{29–31}.

Energistyrelsens studie fra 2014 er det studie, de fleste refererer til og bygger videre på i videre analyser af energisystemet, specifikt det scenarie i studiet, der er kaldt Vindscenariet. Energistyrelsen studie indeholder i alt fire scenarier, nemlig Bio+, Bio, Vind og Brint scenarierne. Bio+ scenariet er næsten ren bioenergi uden væsentlig elektrificering og helt uden elektrolyse, mens de øvrige scenarier indeholder stigende grad af elektrificering og elektrolyse. I vindscenariet og brint scenariet indgår 63 PJ hhv. 81 PJ brint/år. Også i Energinet's studier indgår elektrolyse og brint. Energinet er så langt i sine overvejelser om brints rolle i fremtidens energisystem og kemikalie- og materiale system, at de gennem nogle år har arbejdet med en vision for en stor platform for vindkraft og elektrolyse i Nordsøen i samarbejde med søster-organisationer i de øvrige Nordsølande. Visionen er at udbygge med meget vindkraft i Nordsøen og samle dette på en kunstig ø for her at omdanne det til brint via elektrolyse. Energinet og de øvrige organisationer forventer med andre ord, at brint har en stor rolle i fremtidens samfund, både til energi og kemikalier/materialer.

Efter vores vurdering og kommunikation med andre aktører og eksperter inden for udvikling af fremtidens energisystem, er der i dag ikke nogen, der forestiller sig et system uden høj grad af elektrificering og en vis grad af elektrolyse og brint.

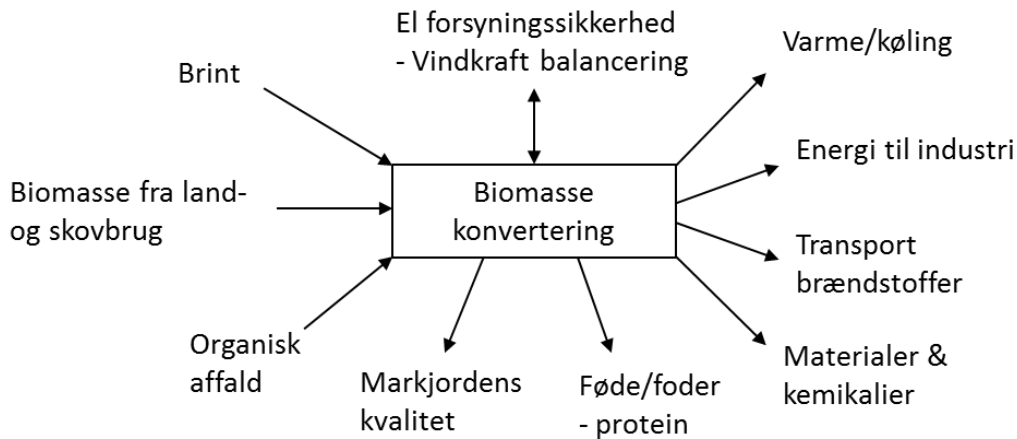
3. Succes kriterier for fremtidens bioenergi og kulbrinteforsyning

Overordnet tilstræber man i design af energisystemet at nå en høj grad af effektivitet på systemniveau. I første omgang tilstræbes et omkostningseffektivt system, men også andre kriterier er vigtige, herunder systemets klima- og miljøeffekt, robusthed/resilience (evnen til at modstå ændringer) og forsyningssikkerhed. Ofte anvendes energieffektivitet som et succeskriterium for energi konverteringsteknologier, men det er kun en intermediær indikator, for reelt er energi ikke begrænsende (der er sol og vind nok). De reelle begrænsninger er penge og plads (økonomi og areal), herunder de konsekvenser arealforbrug har for natur, miljø og klima. De analyserede studier forholder sig endvidere til, at biomasse og kulstof ser ud til at blive begrænsende faktorer i et fossil-frit system^{4,5,16,32,33}, og blandt andet af denne grund indeholder alle studierne scenarier med elektrolyse, brint og CO₂ som kulstofkilde, fordi disse reducerer forbruget af biomasse og areal.

De overordnede performance mål er derfor i sidste ende at finde i omkostningseffektivitet, arealeffektivitet, kulstofeffektivitet, klima- og miljøeffektivitet samt forsyningssikkerhed og robusthed/resilience. En optimering af systemet og en god performance på disse punkter nås bedst ved en høj grad af synergi mellem de teknologier og sektorer, der skal forsynes og tilgodeses, især el, varme, køling, energi til industri, kemikalier og materialer, affaldshåndtering og landbrug, herunder føde, foder og markjordens kvalitet på langt sigt.

En flaskehals og dimensionerende faktor i systemet er den tunge transport, herunder flytransport og den tungeste og længste transport på vej og til havs, fordi disse sektorer vanskeligst lader sig elektrificere og

derfor behøver kulbrinter – i hvert fald inden for den tidshorizont, vi arbejder under i forhold til klimamålene på 1,5 og 2 °C. Biomasse som råvare spiller en afgørende rolle, fordi den største forsyning med kulstof til kulbrinter i alle studier og scenarier kommer herfra, og fordi biomasse i sig selv er central i landbruget. Men biomasse er mange forskellige ting, kan tilvejebringes på mange måder og ikke mindst konverteres til slutprodukter i systemet på mange måder. Netop biomassen og konverteringen af den spiller den helt afgørende rolle i at opnå synergi og høj effektivitet i systemet. Figur 2 illustrerer denne rolle.



Figur 2. Biomassen og biomasse-konverteringen har mange kunder i systemet, og optimeringen af systemet ligger i at skabe synergi i måden, hvorpå de mange kunder tilfredsstilles – fra start til slut, dvs. fra valg af afgrøder og sædskifte til valg og indplacering af konverteringsteknologi

Når de store strategier for innovation af samfundet diskuteres, fx bioøkonomi som en del af afløsningen for den fossile tidsalder, og herunder strategier for

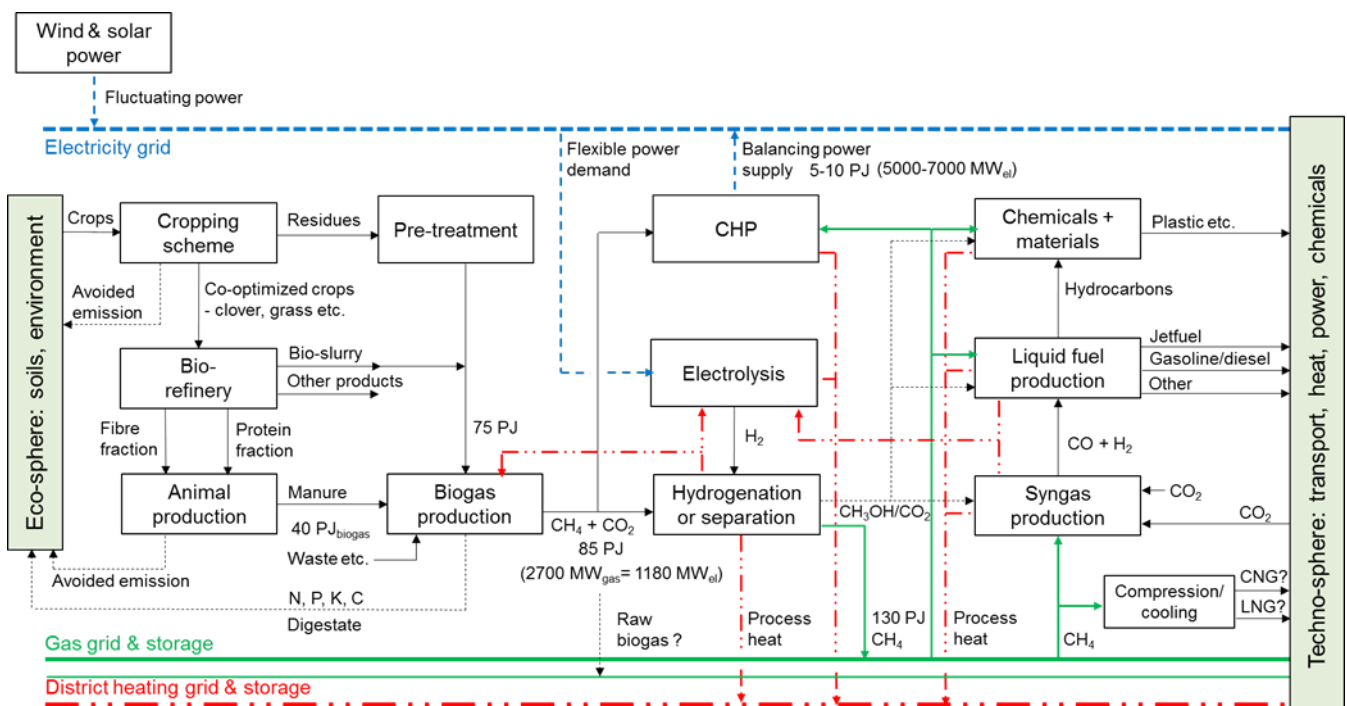
- innovation af landbrug, føde-, foder- og protein produktion
- nye veje til fremstilling af materialer og kemikalier
- nye veje til fremstilling af el, varme, køling og termisk energi til industrien
- og nye veje til transport og fremstilling af transportbrændstoffer

er det derfor afgørende, at det sker i respekt for helheden og under tilstræbt optimering af helheden. I hvert fald hvad angår 'de store tal'. For visse produkter, sektorer og forretningsmuligheder, der er relativt små i volumen, behøves ikke nødvendigvis en større sam-optimering, men for de store behov i samfundet, som el, varme, transportbrændstoffer, materialer og føde/foder, er der behov for at se helheden. Den her skitserede vision er et forsøg på at skitsere en mulig helhed hvad angår samfundets kulbrinteforsyning. Det er som nævnt indledningsvist ment som et scenarie til inspiration og diskussion, men dog et for os meget sandsynligt og attraktivt scenarie. Og det er ment som illustration af, at det er vigtigt at diskutere denne helhed, når strategier for samfundets fremtidige kulbrinteforsyning overvejes.

4. Vision for en bio-økonomisk platform for fremtidens kulbrinteforsyning

Det centrale element i denne vision er, at en hovedindgang til forsyningen af samfundets behov for kulbrinter i fremtidens vedvarende energisystem er biogas. Der kan være flere andre veje til dele af samfundets behov for specifikke kulstofholdige stoffer, men de mængdemæssigt største behov for kulbrinter til transportbrændstoffer og kemikalier/materialer fremstilles i denne vision ud fra biogas som råvare, herunder biogas-CO₂ reageret med brint til methan. Figur 3 illustrerer et procesflowdiagram over visionen. Bemærk, at illustrationen ikke er tilstræbt at vise et fuldstændigt energisystem, men fokuseret på forsyning af tekno-sfæren med kulbrinter.

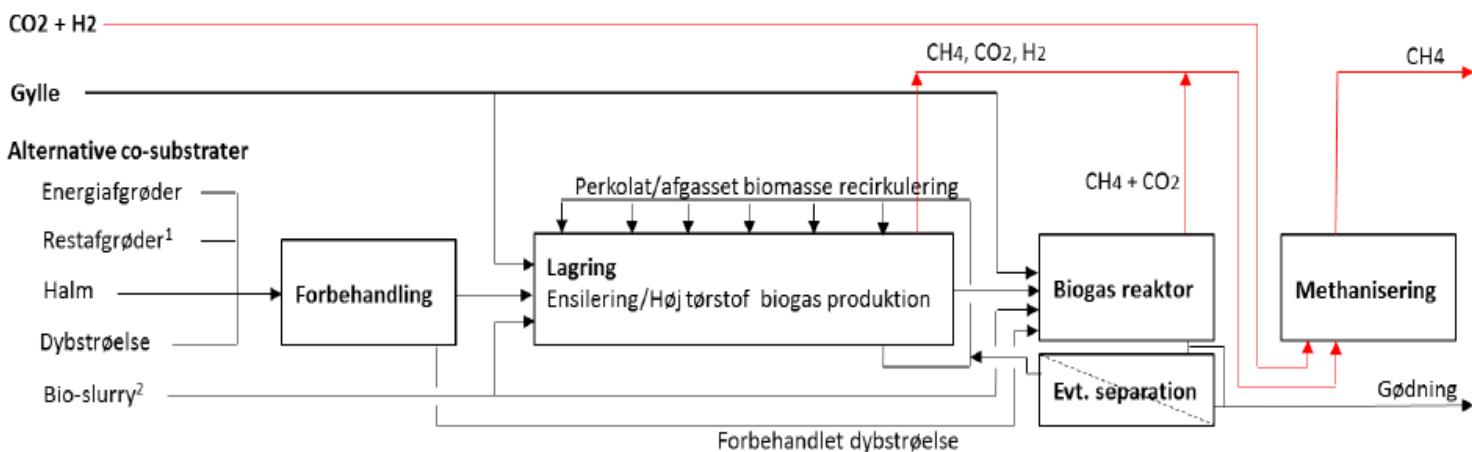
Når vi opgør de bio-ressourcer, vi råder over i form af husdyrgødning, restprodukter fra landbruget (halm, roetoppe, kartoffeltoppe og anden restfraktion fra afgrøders primær-produkter), og når vi indregner opgradering af CO₂-delen med brint, så ender vi på over 100 PJ/år methan³⁴. Det er meget i et højt elektrificeret samfund og tilstrækkeligt til at tilfredsstille alle de store kunder til kulbrinter. Fremtiden kan godt byde på andre veje som fx termisk forgasning af træ til syntesegas eller hydrotermisk liquefaction (HTL) og videre konvertering herfra. Det vil være et meget velkomment supplement, idet det vil muliggøre at også træmasse kan indgå i kulbrinteforsyningen, men teknologisk er det ikke kommercielt tilgængeligt aktuelt. Det er biogas og den videre konvertering af methan til andre og længere kulbrinter, og skalaen af denne vej er stor nok til at dække behovet. Derfor er det en væsentlig reference for både termisk forgasning, HTL og andre konverteringsveje at forholde sig til. Et væsentligt aspekt ved den her viste vision er således, at den kan implementeres med kendt og fuldt afprøvet teknologi, og at den på mange måder er attraktiv, som det beskrives efterfølgende.



Figur 3. En vision for biogas og methaniseret biogas-CO₂ som råvare til fremtidens kulbrinteforsyning

4.1 Biogas og integration med landbruget

Valget af afgrøder og sædskifte i landbruget er et af de første led i kæden, og en innovation af dette er aktuel både i forhold til fremtidens føde/foder/protein forsyning og energiforsyning. En omlægning mod afgrøder som græs og kløver har potentielt positiv effekt på udledninger til miljøet, og en efterfølgende bioraffinering kan have god synergi med biogas, både fordi de skalamæssigt og lokaliseringsmæssigt matcher godt, og fordi sidestrømme fra raffinering egner sig godt til biogas³⁵. Også nuværende restfraktioner som halm og andet har god synergi med biogas, og en anvendelse af halm i biogas har den yderligere synergi, at det som co-substrat til gylle muliggør mere gylle-biogas. Halm og dybstrøelse er aktuelt de eneste mulige co-substrater, der skalamæssigt er tilstrækkelige til at supplere gyllen. Flere biogas anlæg i Danmark i dag er i stand til at anvende halm og et mere er under opførelse på Sjælland. Hvis fremtiden byder på en større skala omlægning fra konventionelle byg/hvede afgrøder til græs/kløver vil biogas-teknologien have stor robusthed/resilience over for dette skifte, fordi en sidestrøm af bioslurry fra græs/kløver raffinering er tilsvarende egnet til biogas. Det ville i mindre grad være tilfældet, hvis halmen var anvendt i andre konverteringsteknologier. En kombineret anvendelse af våd bioslurry og tør halm i en samlet forbehandling (fx ensilering) ville potentielt kunne være en endnu bedre situation. Se Figur 4 for en illustration af en fremtidig biogas konfiguration.



Figur 4. Illustration af en fremtidig konfiguration af biogas anlæg med kombineret lagring og forbehandling af tør halm med våde biomasser samt methanisering af CO₂ med brint. Noter: ¹Kasserede afgrøder (fx kasseret foder) og afgrøder fra anden primærfunktion, fx naturbeskyttelse, ²bio-slurry fra forbehandling af organisk affald (KOD) eller fra bioraffinering

En anden og meget væsentlig synergi med landbruget er biogasteknologiens samspil med markjorden. For det første medfører anvendelse af husdyrgødning til biogas en betydelig reduktion af drivhusgasudledning i forhold til den konventionelle gylle/gødning håndtering³⁶. Men endnu mere betydende er, at N, P, K og svært nedbrydeligt kulstof returneres til markjorden med den afgassede biomasse efter anlægget. Hvad angår N, P og K er fordelene ved dette alment erkendt, nemlig at man undgår den tilsvarende fremstilling af mineralisk gødning. Men hvad angår rest-kulstof fra den tilførte biomasse er det et hidtil ikke tilstrækkeligt erkendt eller kvantificeret aspekt ved biogas, som mange andre teknologier ikke på samme måde indebærer. Biogasteknologien trækker den lettest nedbrydelige kulstof ud som methan, og tilbage er den svært nedbrydelige – i fremtiden formentlig 30-40 % af kulstoffet. Den let nedbrydelige del ville være emitteret som CO₂ fra marken over tid alligevel, mens den tungt nedbrydelige, som er tilbage i den afgassede biomasse, modsat bliver i jorden i lang tid. Det betyder, at biogas i det store og hele ikke tager

noget kulstof fra jorden på langt sigt, men derimod omdanner al det kulstof, som netto fjernes fra markjorden, til en kulbrinte, endda en kulbrinte med højest muligt indhold af brint og dermed højest muligt energiindhold pr. kulstofatom. Mange landmænd tænker meget over at opretholde et højt indhold af kulstof i jorden, og aspektet er væsentligt. Dette hensyn til markjordens kulstofindhold betyder meget for, hvor meget biomasse, der kan fraføres marken og gøres tilgængeligt for kulbrinteforsyning fremover, og biogas har her en stor fordel frem for teknologier, der ikke fører kulstof tilbage. Som reference for andre teknologier at forholde sig til har biogas på dette punkt en næsten 100 % systemeffektivitet i omdannelse af kulstof i fjernet biomasse til kulbrinte, når CO₂-indholdet i biogassen methaniseres med brint. En teknologi som termisk forgasning kan potentielt måle sig med det, fordi rest-koks/biochar fra forgasning kan tilføres marken og er meget svært nedbrydeligt.

4.2 Biogas og integration med el, varme og transport systemet

Den rå biogas (med indhold af CO₂) kan indgå i balancering af el-forsyningen ved vindstille perioder. Det er absolut billigste back-up, fordi gasturbiner og –motorer er absolut billigste installerede effekt pr. MW installeret³⁷. For en back-up, der skal bruges meget lidt, men alligevel stå klar i fuld skala ved helt vindstille, er det investeringsomkostningen, der betyder alt rent økonomisk, mens driftsomkostningen er nærmest ligegyldig. Modellerigerne af energisystemet viser, at back-up skal køre i en mindre del af tiden og i denne tid ofte på mindre blus – og det betyder, at det summa summarum udgør en ret lille skala på omkring 10 PJ/år eller mindre¹⁹. Men samtidig skal den installerede effekt kunne levere hele det ufleksible el-forbrug på omkring 5000 – 7000 MW el i spidslast. Man vil sandsynligvis kunne importere en stor del af denne elektricitet i sådanne perioder, men af hensyn til forsyningssikkerheden ønsker man formentlig politisk at have kapaciteten til rådighed nationalt under alle omstændigheder. Der er ikke noget i fremtidens energisystem, der kan konkurrere med gas under de betingelser.

Men der er det problem, at selv med en meget høj biogasproduktion, svarende til 100 PJ/år som bio-methan plus elektro-methan, så er den kontinuerte biogas produktion kun godt 1000 MW eller omkring 20 % af behovet. Så i perioder med vindstille, slår den kontinuerte produktion af rå biogas ikke til som back-up. Man er nødt til at kunne trække på et lager. På alle nye anlæg i dag skilles CO₂'en fra biogassen, og den tilbageværende rene bio-methan lagres på gasnettet, og det vil formentlig også være tilfældet i fremtiden. Som tidligere beskrevet er der behov for brint i systemet, og biogassens fraseparerede CO₂ indhold er den billigste og lettest tilgængelige kilde til kulstof, som brinten kan reageres med, da den findes i en renere og mere koncentreret form end andre CO₂ kilder. Det er af denne grund attraktivt at opgradere biogassens CO₂ med brint, og det er yderligere en måde at lagre vindkraften på og konvertere el til brændstof via elektrolysen og omdannelsen med brint til methan, som lagres på gasnettet. Da vi i forvejen skal have brint ind i systemet og i forvejen skal have kulbrinter til transport med mere, bliver lagring af methan på gasnettet til senere brug til balancering af el under vindstille den absolut billigste måde at lagre vindkraft på. Heri ligger en meget stor synergi mellem el-balancering, integration af brint og fremstilling af transportbrændstoffer.

Også integrationen med varmforsyningen er noget nær optimal ved biogas. Methaniseringen af CO₂ med brint er en eksoterm (varmeudviklende) proces, der uundgåeligt medfører en varmeudvikling på omkring 20 % af brintens energiindhold. Denne procesvarme skal nyttiggøres, for en (mindre) del til opvarmningsbehovet til forudgående biogasproces og for den største del til fjernvarme eller varmebehov i nærliggende industri. Også elektrolysen kan medføre et varmetab, som skal nyttiggøres. Biogasprocessens

skala, og den tilhørende skala af elektrolysen, passer i skala med mellemstore danske fjernvarmenet. Det skyldes, at biogas er relativt lille i skala. Andre teknologier som fx ethanol-fermentering har en skala-økonomi^{38,39}, der betyder, at de skal være meget større end biogas – for ethanolens vedkommende bl.a. pga. den nødvendige destillation. Det betyder igen, at den tilknyttede procesvarme ved elektrolyse og methanisering af fermenterings-CO₂'en er meget større og så stor, at kun de allerstørste fjernvarmenet i Danmark vil kunne aftage varmen. Det begrænser fleksibiliteten og placeringsmulighederne, hvis procesvarme skal udnyttes – ud over at stor skala er et problem, når biomassen skal køres til anlægget.

4.3 Videre konvertering til længere kulbrinter

Det er muligt, at dele af gasnettet på sigt kan prioriteres til rå biogas, som kan anvendes i industrien eller direkte til videre konvertering til andre kulbrinter, mens andre dele af gasnettet kan prioriteres til den methaniserede biogas/rene methan, det kommer tiden til at vise. Men i nogle årtier gennem transitionen til vedvarende energi vil dette være svært, fordi gassen skal blandes med naturgassen og derfor af den grund skal opgraderes til samme brændværdi og dermed til ren methan. Det er også en mulighed, at den rå biogas konverteres direkte til methanol i en såkaldt co-elektrolyse¹⁴, således at methanolen udgør det videre råstof til kulbrinte forsyningen. Det er teknisk muligt, og de videre konverteringsteknologier fra methanol til længere kulbrinter er så vidt vides også tilgængelige⁴⁰. Men det kræver en meget ren biogas, hvor svovlbrinte og andet er rensset væk helt ned til ppb niveau, for at katalysatoren i co-elektrolysen ikke går til. Modsat kan methanisering af biogas-CO₂'en med brint ske biologisk via methan-dannende mikroorganismer (archaea) i en supplerende og relativt lille biogasreaktor, og den proces er mere robust over for urenheder i biogassen. Endelig kan man vælge blot at tage CO₂'en ud af biogassen med en skrubber eller anden teknologi, som det gøres aktuelt på alle nye anlæg i Danmark, og herefter føre eller køre CO₂'en til centralt placeret anlæg til methanisering eller anden anvendelse af CO₂ i kulbrintefremstilling. Det medfører naturligvis en betydelig omkostning til transport af CO₂, som de øvrige muligheder ikke har, men en potentiel gevinst ved storskala anlæg der, hvor CO₂'en opgraderes til kulbrinter.

Hvilken af disse veje til videre konvertering af den rå biogas, der viser sig mest attraktiv, vil fremtiden vise. Men uanset vejen, er de videre teknologier til konvertering til længere kulbrintekæder kendt teknologi. Konvertering fra biogas eller methan til flydende kulbrinter, gas-to-liquid, er kendt teknologi bl.a. i form af Fischer-Tropsch processen, der anvendes i fuld skala flere steder i verden⁴¹⁻⁴³. Gassen konverteres til syntesegas bestående af brint og kulmonoxid og alt efter input-gassens sammensætning kan der suppleres med brint, CO₂ og vand. Syntesegassen konverteres videre til længere kæder. Også jetfuel kan syntetiseres ad denne vej, og der findes flere varianter heraf⁴⁴. En variant giver et vægtudbytte på knap 40 % jetfuel og resten sideprodukter i form af diesel og benzin. En anden giver omkring 60 vægt-% jetfuel og resten benzin. Disse side-produkter kan anvendes som brændstoffer til tung transport i øvrigt – og det er værd at bemærke sammenhængen. Jetfuel er proportionsmæssigt betydelig, og i stigende grad fremover. Hvis vi vil lave jetfuel via Fischer-Tropsch processen, får vi derfor væsentlige mængder andre brændstoffer, som i givet fald skal nyttiggøres i transportsektoren. Vi skal tænke over dette, inden vi kommer for langt med at finde andre løsninger til de tunge lastbiler og skibstransporten, fordi det hænger sammen. Proportionerne er sådan, at vi faktisk kan tilfredsstille al tung transport på vej og til havs, som ikke kan elektrificeres, med sideprodukterne til jetfuel.

Det er også værd at bemærke den samlede kulstof-nyttevirkning i denne syntesevej fra markens biomasse til brændstof. Det er i princippet muligt at undgå tab af kulstof i både konverteringen til syntesegas i Fischer-Tropsch og i den videre jetfuel produktion. Endvidere kan yderligere CO₂ fra punktkilder eller fra atmosfæren integreres i processen, og den resulterende kulstof-nyttevirkning kan blive højere end 100 % regnet som kulstof i de producerede kulbrinter pr. biomasse-kulstof input. Der er som nævnt et energitab til varme undervejs, som skal nyttiggøres til fjernvarme eller andre processer, men det kommer alt sammen fra vind- eller solkraft som er ubegrænset, ikke fra biomasse, som er begrænset. Som nævnt er det ment som en reference, som det er værd at forholde sig til for andre mulige konverteringsveje.

5. Økonomi og forretningsmodeller

Der er fra flere sider vist interesse for denne syntesevej og for bio-methan som råvare til kulbrinter, herunder for de såkaldte elektro-brændstoffer og elektro-polymerer lavet fra CO₂ og brint som råvarer. Både plastindustrien i Danmark og konkrete plastforbrugende virksomheder har udtrykt, at det er et scenarie, de ser på. Det samme har luftfarten og skibsfarten. For disse industri-grene ville et sådant scenarie, såfremt økonomien tillader det, betyde en radikal ændring af deres image og markeds-placering.

Som nævnt findes gas-to-liquid teknologier allerede, både den førnævnte Fischer-Tropsch proces og andre. Det er derfor muligt at vurdere med nogenlunde sikkerhed, hvad kulbrinter fremstillet ad denne vej kommer til at koste sammenlignet med den aktuelle pris på plast fremstillet ud fra råolie, og alt peger på, at prisen højst bliver 2-3 gange den nuværende via en syntesevej, der starter med brint og CO₂⁴⁵⁻⁴⁷.

Det er samtidig interessant, hvor lidt selve plast-råvaren generelt koster i forhold til slutproduktet for plastholdige produkter. Jomfruelig plast (fremstillet fra olie som råvare) kan købes på markedet for 10-20 kr./kg alt efter plasttypen. Men i de slutprodukter, hvor plasten anvendes, udgør råvareprisen meget lidt:

- antages 500 g plast i en bærbar PC, udgør plastprisen dermed højst 2 promille af produktets pris
- antages 5 g plastfolie som emballage omkring T-bone steaken i supermarkedet, udgør prisen for denne plast dermed 1 promille af produktets pris for en steak til 50 kr.
- tilsvarende regnestykker for LEGO produkter viser, at råvare prisen ligger på 1-2 % eller deromkring alt efter, hvilket produkt der er tale om

Tilsvarende vil formentlig gælde de fleste andre produkter, hvor plast indgår, fordi en færdigvares pris er domineret af den arbejdstid, der medgår gennem hele forsyningskæden, samt den knowhow, der er indbygget i produktet. Her betyder plast-råvaren meget lidt. Af samme grund vil det næsten ikke kunne ses på produktets pris, hvis plasten var elektroplast lavet af CO₂ og brint.

Men hvad vil image-værdien være, når en bedsteforælder skal købe legoklodser som julegave til sit barnebarn og gerne vil give en andel af familiens CO₂ videre som fixeret CO₂, der er taget ud af atmosfæren, og 'aldrig skal tilbage til atmosfæren igen', fordi legoklodserne skal gå i arv i familien fra generation til generation? Og hvilken indkøbspolitik ville rektor på universitetet vælge i lyset af den store klimabevidsthed hos kommende studerende og ansatte, når PC'ere med plastkomponenter af elektroplast kommer på markedet og kun koster 4 promille mere end dem med fossil plast?

Prisen på flybrændstoffer udgør en noget større del af slutproduktet (flybillettens) pris, og en fordobling af brændstofprisen for elektrobrændstoffer i forhold til de fossile flybrændstoffer vurderes at medføre omkring 20 til 30 procent forøgelse af flybillettens pris. Men en prisforhøjelse af denne størrelse er mindre end den prisforskel, vi oplever som funktion af, hvornår vi bestiller flybilletten, og langt mindre end

forskellen mellem første klasse, business og standard. Igen vurderes imageværdien at være væsentligt højere, og hvilken politiker ville afstå fra at betale 20-30 % mere for flyrejsen, hvis brændstoffet beviseligt er lavet af CO₂ og brint fra vindkraft? Hvilket universitet ville nægte sine medarbejdere at flyve på en sådan 'grøn billet', og hvilket forskningsråd ville forkaste budgettet for et forskningsprojekt, hvor rejseudgifterne var forøget med dette – svarende til en meget lille samlet budgetforøgelse på maksimalt en procent på det samlede budget for projektet? I den fremtid, vi imødeser, og den forventelige fokus på klimaproblemer, ville det ikke være politisk muligt at afvise de i praksis meget små ekstraomkostninger til klimaneutrale flyrejser.

6. Visionens danske styrkepositioner

Danmark har gode muligheder i alle led i kæden i den her skitserede vision. Vi har landbrugskompetencen i afgrødevalg og dyrkning og samspillet med naturbeskyttelsen/udledningerne til vandløb mm. Vi har stor kompetence i bioraffinering til proteinproduktion med potentiale for at blive internationalt førende. Vi har stor biogas kompetence med bl.a. Nature Energy som er verdens største producent af bio-methan til gasnettet. Vi har et af verdens mest omfattende og bredt dækkende gasnet og stor kompetence i at drive det. Vi er blandt de førende inden for methanisering med aktiviteter ved Foulum, DTU, Electrochaea, SDU og Haldor Topsøe. Vi er førende inden for katalyse ved Haldor Topsøe, herunder både til elektrolyse og fysisk/kemisk katalyse til methanisering. Vi har fjernvarme nettene til at nyttiggøre procesvarmen og kompetencen til at gøre det. Vi har system-kompetencen i forhold til vindkraft og balancering ved Energinet og andre, og vi har Energinet's vision om en brint-hub i Nordsøen – som hvis den realiseres i høj grad vil skubbe på nærværende kulbrinte vision. Og så har visionen om en bio-methan indgang til kulbrintefremstilling den styrke, at gasnettet forbinder hele Europa, så en videre forarbejdning af gas-to-liquid ikke nødvendigvis behøver at ske i Danmark. Så Danmark kan få en rolle som leverandør af grønt råstof til kulbrinter. Men måske vores fjernvarme er så fordelagtig, at også de videre processer med fordel kan lægges her.

7. Konklusion

Plast kan umiddelbart synes at være en oplagt sektor til elektro-kulbrinter. Med CO₂ som råvare, ville diskussionen om CO₂ neutralitet være meget enkel og ikke influeret af fremtidens polemik om bæredygtigheden af biomasse forbrug. Der er allerede i dag, før verden reelt er påbegyndt en udfasning af fossile brændstoffer, en stor diskussion om bæredygtigheden af at anvende biomasse og følsomheden af verdens naturarealer. Hvis først verden for alvor søger at lade biomasse fortrænge de fossile brændsler, og klodens arealer i øvrigt er presset af stigende befolkning og øget velstand, vil denne debat vokse sig meget stor, og enhver der satser sin forretning på bioplast eller biobrændstoffer, vil være underlagt vilkårene i denne debat. Det er man helt fri for, hvis råvaren er CO₂ og brint, og prisen for bioplast/biobrændsler og elektroplast/elektrobrændsler er formentlig ikke afgørende forskellig.

Plastindustrien kunne indtage en position som en ledende aktør i verdens klimaindsats og en plads som et klimamæssigt bæredygtigt attraktivt materiale til alle slags formål. Og så er betydningen af den uundgåelige ekstraomkostning ved brug af CO₂ mindre for plast end for alle andre anvendelser af CO₂.

Syntesevejen over biogas til metan eller methanol og til længere kulbrintekæder er som nævnt meget effektiv i det samlede system perspektiv. Samtidig tapper den hurtigt ind i hele den nuværende kemiske infrastruktur. Den væsentlige forskel er alene, at råvaren er metan eller methanol og ikke råolie.

Af de grunde er vores hypotese, at bulk kemikalier & materialer som fx de konventionelle højvolumen termoplast typer, som også er meget enkle i deres molekyl-struktur (PE, PP, PS, PVC), attraktivt vil kunne fremstilles ad denne vej. Hvis en fermenteringsvej til polymerfremstilling fx polylactat, polysuccinat eller polyhydroxyalkanoat, skal være konkurrencedygtig, er vores hypotese, at der skal være særlige kvaliteter ved den aktuelle polymers funktionalitet/molekylstruktur, som efterspørges i særlige applikationer. Fordi fermenteringsprocesser oftest giver meget ringere udbytte målt som kulstof i produktet pr. inputkulstof og fordi det oftest involverer en separationsproces, som er vanskelig og omkostningstung. Hvis vi ser på syntesevejen fra biogas til kulbrinte eller anden polymer, som vist i den her illustrerede vision, har den ikke sådanne tab og omkostninger involveret.

8. Referencer

1. Pachauri, R. K. & Meyer, L. A. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014).
doi:10.1017/CBO9781107415324
2. CDIAC. Global Carbon Project. (2016). Available at: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/GCP/>. (Accessed: 6th May 2019)
3. Le Quéré, C. *et al.* Global Carbon Budget 2016. *Earth Syst. Sci. Data* **8**, 605–649 (2016).
4. Chum, H. *et al.* Bioenergy. in *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, et al.]* 209–332 (Cambridge University Press, 2011).
5. Creutzig, F. *et al.* Bioenergy and climate change mitigation: An assessment. *GCB Bioenergy* (2015).
doi:10.1111/gcbb.12205
6. Haberl, H. *et al.* Bioenergy: how much can we expect for 2050? *Environ. Res. Lett. Environ. Res. Lett* **8**, 31004–5 (2013).
7. IEA. *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*. (2017).
8. World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation & McKinsey & Company. *The New Plastics Economy - Rethinking the future of plastics*. (2016).
9. Carus, M. Biopolymers for Denmark ? Slideserie (2019).
10. Mathiesen, B. V. *Ingeniørforeningens Energiplan 2030*. (2006).
11. Mathiesen, B. V., Lund, H. & Karlsson, K. *IDA's Klimaplan 2050: Baggrundsrapport*. (2009).
12. Mathiesen, B. V. *et al.* *IDA's Energy Vision 2050*. (2015).
13. The Danish Commission on Climate Change Policy. *Green energy - the road to a Danish energy system without fossil fuels*. (2010).
14. Lund, H. *et al.* *Coherent Energy and Environmental System Analysis*. (2011).
15. DEA. *Energy scenarios towards 2020, 2035, and 2050 [In Danish: Energiscenarier frem mod 2020, 2035 og 2050]*. (2014).
16. Wenzel, H. *et al.* *Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system*. (2014).
17. Energinet. *Energi 2050 - udviklingsspor for energisystemet*. (2010).
18. Energinet. *Energikoncept 2030 - Baggrundsrapport*. (2015).
19. Energinet. *Systemperspektiv 2035*. (2018).
20. Climeworks. Climeworks – Capturing CO2 from Air. Available at: <http://www.climeworks.com/>.

(Accessed: 18th December 2018)

21. Carbon Engineering. Carbon Engineering: CO₂ capture and the synthesis of clean transportation fuels. Available at: <http://carbonengineering.com/>. (Accessed: 18th December 2018)
22. Skytree. Skytree[®] - Direct Air Capture. Available at: <https://www.skytree.eu/>. (Accessed: 18th December 2018)
23. InfiniTree. InfiniTree. Available at: <http://www.infinitreellc.com/>. (Accessed: 18th December 2018)
24. Global Thermostat. Global Thermostat. Available at: <https://globalthermostat.com/>. (Accessed: 18th December 2018)
25. Center for Negative Carbon Emissions. Center for Negative Carbon Emissions. Available at: <https://cnce.engineering.asu.edu/>. (Accessed: 18th December 2018)
26. Nel Hydrogen. Nel Hydrogen - Unlocking the potential of renewables. Available at: <https://nelhydrogen.com/>. (Accessed: 18th December 2018)
27. Hydrogenics. Hydrogenics - Innovators in Hydrogen Technology & Solutions. Available at: <https://www.hydrogenics.com/>. (Accessed: 18th December 2018)
28. Hydrogen Europe. Hydrogen Europe. Available at: <https://hydrogeneurope.eu/>. (Accessed: 18th December 2018)
29. Sasol. Sasol. Available at: <https://www.sasol.com/>. (Accessed: 18th December 2018)
30. PetroSA. PetroSA – South Africa’s National Oil Company. Available at: <http://www.petrosa.co.za/Pages/Home.aspx>. (Accessed: 18th December 2018)
31. Greyrock. Greyrock. Available at: <http://www.greyrock.com/>. (Accessed: 18th December 2018)
32. Mathiesen, B. V. *et al.* Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. *Appl. Energy* **145**, 139–154 (2015).
33. Wenzel, H. Breaking the biomass bottleneck of the fossil free society. (2010).
34. Ea Energianalyse. *Biogas and other renewable fuels for heavy duty transport - analysis of the possibilities and challenges related to facing out fossil fuels [In Danish: Biogas og andre VE brændstoffer til tung transport - Analyse af muligheder og udfordringer ved udfasning]*. (2016).
35. Gylling, M., Jørgensen, U. & Bentsen, N. S. *The + 10 million ton plan - opportunities for an increased Danish production of sustainable biomass for biorefineries [In Danish: + 10 mio. tons planen - muligheder for en øget dansk produktion af bæredygtig biomasse til bioraffineringer]*. (2012).
36. Mikkelsen, M. H., Albrechtsen, R. & Gyldenkerne, S. *Biogasproduktions konsekvenser for drivhusgasudledning i landbruget*. (2016).
37. Danish Energy Agency & Energinet. *Technology Data for Energy Plants for Electricity and District heating generation*. (2018).
38. Maabjerg Energy Center. Råvarer i rigelige mængder. (2018). Available at: <https://www.maabjergenergycenter.dk/fakta-om-mec/input-output>. (Accessed: 13th December 2018)

39. Maabjerg Energy Concept. *STATUSRAPPORT STARTEN PÅ DANSK BIOØKONOMI*. (2015).
40. Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W. & Raksha, T. Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review. *Chemie-Ingenieur-Technik* **90**, 127–140 (2018).
41. Shell. Gas-to-liquids | Shell Global. Available at: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/gas-to-liquids.html>. (Accessed: 18th December 2018)
42. Sasol. Sasol takes to the skies with the world's first fully synthetic jet fuel | Sasol. (2010). Available at: <http://www.sasol.com/it/media-centre/media-releases/sasol-takes-skies-world-s-first-fully-synthetic-jet-fuel>. (Accessed: 2nd February 2018)
43. Sasol. Sasol achieves approval for 100% synthetic jet fuel | Sasol. (2008). Available at: <http://www.sasol.com/media-centre/media-releases/sasol-achieves-approval-100-synthetic-jet-fuel>. (Accessed: 2nd February 2018)
44. de Klerk, A. *Fischer- Tropsch Refining*. (2011).
45. Energinet. Ptx i danmark før 2030. (2019).
46. Brynolf, S., Taljegard, M., Grahn, M. & Hansson, J. Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. (2017). doi:10.1016/j.rser.2017.05.288
47. Terwel, R. & Kerkhoven, J. *Carbon neutral aviation with current engine technology: the take-off of synthetic kerosene production in the Netherlands*. (2018).