

# **Utvecklingen och användningen av konstgjord fotosyntes som energikälla**

**Författare:** Matthis Schneider

**Handledare:** Sören Källgren

**Datum:** 27.4.2014



## **Abstract**

This paper was written with the intention of considering the evolution of *artificial photosynthesis* (AP). Focus was on the general principles of AP, which problems and limitations the technology faces, and how the development of an artificial leaf progresses. Issues for research were split into three parts. Two considered the technology and research of AP, what limitations and problems it faces, and furthermore – if the technology is viable today – why it is not yet distributed. The final issue considered the artificial leaf. An understanding of the subject was reached with the help of literature, other text-based sources and conversations with scientists researching this area of science.

AP technology exists today, though mostly as concepts under intensive research, though the technology of AP is mostly considered unstable and not viable for any large-scale production or distribution. To improve the technology must mainly be stable and act as an effective way to produce biofuels.

Artificial photosynthesis is underway to become a very promising technology, but to support a future society the technology will need to evolve further.

**Keywords:** *Artificial photosynthesis, sustainable energy, biochemistry, financial viability.*

# Innehållsförteckning

<b>1. Inledning</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Bakgrund</b>	<b>6</b>
1.1.1 Varför behövs konstgjord fotosyntes?	7
1.1.2 Vad innebär konstgjord fotosyntes?	9
1.1.3 Tidigare konstgjord fotosyntes	10
<b>1.2 Syfte och frågeställningar</b>	<b>11</b>
1.2.1 Frågeställningar	11
<b>1.3 Metod</b>	<b>11</b>
1.3.1 Litteraturstudier	11
1.3.2 Muntliga källor	11
<b>1.4 Teorier</b>	<b>12</b>
1.4.1 Fotosyntes	12
1.4.2 Konstgjord fotosyntes	15
<b>2. Resultat och analys</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Resultat</b>	<b>23</b>
2.1.1 Det skadliga förnybara	23
2.1.2 Konstgjord fotosyntes som ledande teknologi	24
2.1.3 Problem kring konstgjord fotosyntes	25
2.1.4 Användningen av konstgjord fotosyntes	27
<b>2.2 Analys</b>	<b>29</b>
2.2.1 Faktorer som hindrar konstgjord fotosyntes	30
2.2.2 Varför lanseras inte konstgjord fotosyntes?	31
2.2.3 Det konstgjorda bladet	36
<b>3. Sammanfattning</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Sammanfattning av frågeställningar</b>	<b>38</b>

<b>4. Slutdiskussion</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Framtidens konstgjorda fotosyntes</b>	<b>41</b>
<b>4.2 Metodval</b>	<b>41</b>
<b>Referenser</b>	<b>42</b>
<b>Övriga referenser</b>	<b>45</b>
Tryckta källor	45
Internetkällor	45
<b>Bildkällor</b>	<b>48</b>

# 1. Inledning

## 1.1 Bakgrund

Människan har genom historien använt sig av ett flertal mycket miljöförstörande och ineffektiva energikällor. Dessa har i många fall utgått från begränsade resurser som avger skadliga ämnen och restprodukter, vilka rubbar den känsliga balansen och de ekosystem som har tagit hela tidsåldrar för evolution och natur att bygga upp. Många vetenskapliga och tekniska landvinningar som för århundraden sedan ansågs vara moderna och rena, är idag förkastade som mycket skadliga och ineffektiva. Ångmaskinen stod bakom den industriella revolutionen och ökade både fabrikers effektivitet och arbetskraften i dessa mycket kraftigt, men är idag ersatt av en mängd effektivare metoder för att alstra kraft. Faktum kvarstår dock att denna maskin för ett flertal hundra år sedan ansågs vara den mäktigaste kraft som fanns att tillgå med teknikens framsteg. Idag finns elektriska motorer med kraft och högre verkningsgrad än ångmaskiner, och även dessa så kallade elmotorer har fortfarande en lång väg kvar för att nå höjden av sin prestanda.

Sedan länge har naturen gäckat oss med sina effektiva och resurssparande sätt att införskaffa sig energi. Då vi människor själva är beroende av stora mängder energi genom ohållbara sätt att omvandla dessa är vi självklart fascinerade av naturens rena kraftverk och hållbara framtid. Vägen fram till fullkomligt hållbara energikällor – som även kan accepteras av alla delar i samhället – är dock mycket svårframkomlig och har en mängd sidospår som leder iväg mot utforskade områden. Alla dagens befintliga hållbara energikällor har mött svårigheter att få enhälligt acceptans bland delar av samhället och naturen. Människor störs av både vindkraft- och kärnkraftverk, djur skadas av vattenturbiner och kolkraft, samtidigt som hela ekosystem förstörs av samhällets strävan efter mer energi och bränsle. Även de energiformer som rubricerats som miljövänliga visar sig ha svårigheter att slå igenom som de dominerande metoderna att alstra energi. Vindkraft har länge setts som ett elegant och simpelt sätt att generera elektricitet genom vindens rörelseenergi. Få vill dock ha vindkraftverk inom synhåll till samhällen och många av naturens invånare, bland annat fåglar, kan skadas om de vistas eller flyger igenom de så kallade vindkraftsparkerna. Solkraften som genereras av solceller har också denna visat sig ineffektiv på de platser där den i stor skala har utförts. I Tyskland, där många projekt för att introducera solkraften som den dominerande energiformen har inletts, visar sig problem med denna skonsamma metod att fånga in solens livgivande ljus.<sup>[1]</sup>

Naturens svar till diskussionen om hållbara energikällor är så självklar att den oftast inte dyker upp inom teknisk forskning. Genom denna process används några av naturens mest fundamentala byggstenar för att sedan bli omkonstruerade till precis det växten – naturens

syreskapare och energitillgång – behöver för att kunna växa sig uppåt mot tillgången den är i störst behov av, solljuset. Denna process kallas för fotosyntesen.<sup>i</sup>



Med denna process kan växten, genom att sönderdela vattenmolekyler och sedan spjälka dessa med vätejoner och koldioxid, skapa sin egen energi och sitt eget byggmaterial. Som restprodukt återstår sedan syrgas, vilken vi organismer med cellandning nyttjar väl.

### 1.1.1 Varför behövs konstgjord fotosyntes?

Idag finns många problem med världens energiförsörjning och den stora efterfrågan på fossila bränslen. Dessa förstör sakta men säkert mycket av de ekosystem och den balans som naturen själv har skapat under loppet av miljontals år. Energikällor med mindre åverkan på miljö och vår planet är av stor vikt för att vi i framtiden ska kunna försörja oss med tillräckliga mängder av så kallad "grön energi" – energi som tagits fram på miljövänliga sätt. Till dessa räknas ett flertal olika metoder för att framställa denna gröna energi, såsom vattenkraft, vindkraft och även den som detta arbete kommer att rikta in sig mot: användandet av solens energi.

Solkraft har länge använts som en energikälla. Redan under antiken användes produkter av solens energi av människan, det vill säga produkter som exempelvis torv, virke och gräs. Även antikens högkulturer använde sig av speciella designar på hus och byggnader för att utnyttja solens varma kraft optimalt.<sup>[2]</sup> Vi har alltså sedan innan antiken använt oss av solenergin som i miljarder år kommer att stå till förfogande, och på grund av detta har vi både omfattande kunskap av solens viktiga funktion men även ett behov av att utnyttja denna. Bäst har dock växterna anpassat sig för att maximalt kunna utnyttja solens energi genom fotosyntesen, eller den process där växten omvandlar fotonenergi i solljuset till kemiskt bunden energi (det vill säga produkter som bl.a. sockerarter). Naturens förmåga att mycket effektivt utföra många oerhört komplicerade processer visar att människan fortfarande har mycket att lära av naturen även med dagens mycket avancerade teknik och framsteg till förfogande.

Kemiprofessorn Nate Lewis vid Caltech (California Institute of Technology) menar att konstgjord fotosyntes är mycket viktig då tekniken inte kommer att bidra till växthuseffekten, och heller inte kommer att konkurrera med jordbruket om åkermark som

---

<sup>i</sup> Med energi menas den elektromagnetiska strålning solen bidrar med i reaktionen.

vissa biobränslen gör.<sup>ii</sup> Diskussionen huruvida den konstgjorda fotosyntesen verkligen behövs då vi redan har solceller för att producera elektricitet ifrågasätts även av Lewis. “Fyrtio procent av global transportation – lastbilar, fartyg och flygplan – kan inte bli elektrifierade,” konstaterar Lewis. Därför behövs tekniken för att kunna framställa lika energirika bränslen som de fossila bränslen vi använder idag för att kunna hålla igång den globala transportkedjan.<sup>[3]</sup>

### **Miljöförstörelsen**

Genom att anpassa naturens fotosyntes till en konstgjord process, för att med hjälp av solenergin skapa olika produkter eller energibärare, kan man alltså med mycket liten åverkan på miljön effektivt försörja stora delar av världens energibehov. Investeringen är troligtvis endast mycket små mängder kostsamma eller sällsynta material och utan skadliga produkter.<sup>iii</sup>

Den dominerande metoden att framställa elektricitet är idag genom kraftverk som med hjälp av exempelvis, olja, naturgas eller kol genererar elektricitet i stor utsträckning.<sup>[4]</sup> När fossila bränslen som dessa bränns frigörs dock en mängd skadliga ämnen, inte minst växthusgaser. Växthusgaserna påverkar sedan miljön genom att de stänger inne solens värme i atmosfären och på så sätt orsakar klimatförändringar och i längden stora problem för jordens ekosystem. Trots att jorden själv under lång tid har frisatt växthusgaser som metan eller koldioxid genom naturliga orsaker som bränder, vulkanutbrott eller gejsrar, har vi människor accelererat denna process oerhört genom användningen av bensin, kol och andra bränslen som under miljontals år varit undandömda från atmosfären. De största problemen med förbränningen av fossila bränslen är idag utsläppen av atmosfäriska växthusgaser, klimatförändring, försurning av exempelvis haven och geopolitisk instabilitet. Geopolitisk instabilitet innebär att internationell politik och internationella relationer och geografins effekt på dessa, skadas av fossila bränslets dominans på energimarknaden. Exempelvis har många krig i mellanöstern utkämpats med fokus på oljan och de naturresurser som finns där.<sup>[5].[6]</sup> Trots att det idag finns hårda regulationer på kraftverk som bidrar till miljöförstörelsen kvarstår problemet med hur denna kris ska lösas, och vad som ska ersätta den idag livsviktiga användningen av fossila bränslen.

---

<sup>ii</sup> Exempelvis etanolodlingar har sagts konkurrera ut andra biotoper.

<sup>iii</sup> Här syftas på de ämnen som används av växters fotosyntes – vatten, koldioxid och organiska molekyler.



### 1.1.2 Vad innebär konstgjord fotosyntes?

Konstgjord fotosyntes är en process som efterliknar den energibindande mekanism som finns i växter och gröna alger. Detta innebär att man använder solens energirika strålar för att spjälka vatten och sedan använda den energi som frigörs då vattenmolekylernas kemiska bindningar bryts. Energin binds sedan i molekyler som skapas av andra beståndsdelar för att forma en produkt av processen, produkter som med dagens konstgjorda fotosyntes till exempel är vätgas eller andra organiska molekyler. Själva termen konstgjord fotosyntes syftar idag ofta på efterliknandet av exempelvis vissa cyanobakteriers förmåga att skapa vätgas av vatten och därmed ett mycket effektivt biobränsle. Genom att efterlikna denna process kan vi syntetisera stora mängder av detta biobränsle med relativt små direkta kostnader, och samtidigt inte påverka miljön eller andra faktorer nämnvärt då både material och produkter för processen inte är, eller förväntas vara, skadliga för miljön.

Principen bakom konstgjord fotosyntes har självklart använts av naturen i miljontals år, men av människan endast nått betydande framsteg på senare tid. Trots att idéer och försök kring konstgjord fotosyntes har pågått sedan 60-talet så kom det första konkreta beviset på att processen funkar med en enda integrerad enhet så sent som på 90-talet. Då kunde John Turner från *National Renewable Energy Laboratory* visa att det är möjligt att skapa vätgas av vatten med hjälp av en flerskiktig, monolitisk halvledare med en verkningsgrad på cirka 10 procent. Verkningsgraden syftar på den energi som bevaras av solenergin, i detta fall blir alltså cirka 10 procent av denna till kemiskt bunden energi. Arbetet med att efterlikna de extremt komplexa och inte minst självreparerande processerna i naturlig fotosyntes är som väntat mycket svårt och kräver även utrustning av mycket hög standard och precision. Detta gör att grupper som gemensamt arbetar för ett mål inom ramen för konstgjord fotosyntes har skapats för att på så sätt kunna samla den information och arbetskraft som krävs effektivt.

#### **Joint Centre for Artificial Photosynthesis**

En av dessa kollaborationer är det amerikanska Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP) som vill utveckla ett kostnadseffektivt sätt att skapa bränslen genom att bara använda solljus, vatten och koldioxid som insats. Det vill säga klassisk fotosyntes utnyttjad som en bränsleutvecklande process. Målet är att utvinna väte eller andra organiska ämnen. JCAP grundades år 2010 av den amerikanska regeringens energidepartement, och har en budget på 122 miljoner dollar (ca. 790 miljoner kronor) över en tidsram på fem år. Samarbetets två huvudsakliga center finns vid *California Institute of Technology* (Pasadena, Kalifornien) samt *Lawrence Berkeley National Laboratory* (Berkeley,

Kalifornien).<sup>iv</sup> Utöver dessa center finns ett flertal andra universitet och laboratorier med i samarbetet, vilket gör att projektet kan nyttja en mängd tillgångar och material – inte minst all den kompetens som går att finna vid respektive universitet och laboratorium. Runt 120 forskare arbetade 2013 med att skapa ett fungerande koncept av konstgjord fotosyntes till år 2015. Detta innebär att samarbeten som JCAP har mycket bra förutsättningar att lyckas med sina mål om en energiproduktion som utgår från konstgjord fotosyntes.

### 1.1.3 Tidigare konstgjord fotosyntes

En viss form av konstgjord fotosyntes finns redan, i formen av solceller som alstrar ström då de utsätts för solljus. Dessa har dock få likheter med den fotosyntes organismerna nyttjar, då solceller enbart alstrar en elektrisk ström som används direkt i elnätet. Fotosyntesen har även använts som en sorts konstgjord process genom att olika växter har odlats som nyttoväxter för föda, byggmaterial eller foder. Gräsarter har kultiverats till arter som idag är mycket viktiga för produktionen av exempelvis mat. Det virke som används vid byggandet av hus och en mängd andra föremål är också produkter av fotosyntesen. På så sätt har människan sedan tusentals år redan använt sig av denna process, och vi har redan fått mycket hjälp på vägen av solens gynnsamma energi.<sup>[2]</sup>

Inte heller den industriella revolutionen hade klarat sig länge utan kolet, som också kommer från delar av bland annat växter som under lång tid har lagrats i sedimentär berggrund under högt tryck. För att hålla ångmaskiner och fabriker levande under denna industrins högtid krävdes oerhörda mängder av kol, som dock har en erkänt negativ inverkan på miljön i och med att förbränningen av detta bränsle släpper ut bland annat koldioxid, som sedan miljoner år har varit bundet under marken, undagömt från atmosfären. Används kol som bränsle släpper man lös det koldioxid som träd för mycket länge sedan band genom fotosyntesen, och vänder den process där växter i stort sett renar luften från koldioxid och ersätter den med syre. Kommer istället den konstgjorda fotosyntesen in i bilden kan denna energikälla åter igen vända på processen. I åtanke måste dock ha att mycket av den syntetiska fotosyntesen idag inte binder koldioxid, utan istället spjälkar vatten till vätgas och syrgas. Vägen till att syntetisera samma fotosyntes som förser växterna med näring och byggnadsmaterial, det vill säga kolhydrater, är fortfarande lång.

---

<sup>iv</sup> Se <http://solarfuelshub.org/about/> för mer information.

## 1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta arbete är att undersöka om vissa typer av konstgjord fotosyntes fungerar i teorin och hur dessa sedan kan utvecklas i praktiken. Arbetet kommer även att undersöka om dessa utvecklade processer sedan går att utveckla för att möta energibehovet inom en inte allt för avlägsen framtid. Detta arbete utreder även om det är möjligt att inom en snar framtid kunna genomföra effektiv och relativt billig konstgjord fotosyntes, som kan framställa råvaror såsom vätgas eller andra former av biobränslen. Denna bör även ha ett eller flera användningsområden eller pågående processer i mörker, för att inte begränsa användningen till dagens soltimmar. Hur kan problemen med katalysatorer, material och funktionalitet för denna process lösas? Fokus läggs här på miljö och kostnaden att producera och lansera dessa energiformer som enkla och effektiva metoder för energiförsörjning.

### 1.2.1 Frågeställningar

- *Fungerar konstgjord fotosyntes i teorin och i praktiken med den kunskap vi har idag? Om inte, vilka är begränsningarna och problemen?*
- *Varför tillämpas den inte för storskalig energiproduktion?*
- *Hur fungerar det så kallade "konstgjorda bladet", och vilka är grundprinciperna och problemen? Vilka är de viktigaste återstående frågeställningarna kring detta ämne?*

## 1.3 Metod

### 1.3.1 Litteraturstudier

Fokus låg dels på de publikationer och den information som redan fanns tillhanda genom internet, böcker och annan litteratur. Genom textstudier kunde en djupare förståelse för arbetets natur och syfte fås, och det var tidvis relativt enkelt att fördjupa sig i den teori som området har att erbjuda. Primära källor var främst publikationer på internet då dessa erbjuder en mängd olika perspektiv och varierande syn på ämnet i fråga. Man kan här även snabbt komma i kontakt med ny information. Även texter i böcker och andra medium användes, framför allt den studentlitteratur som redan var tillgänglig.

### 1.3.2 Muntliga källor

Muntliga källor kommer att citeras i denna rapport, och detta innebär information som fås genom diskussion eller intervjuer med exempelvis lärare eller utbildad universitetspersonal. Dessa är en viktig källa till ny och nyanserad information, då följdfrågor kan ställas och utförliga svar efterfrågas.

En person jag kommer att samtala med och ha möjlighet att ställa frågor till är professor Johannes Messinger från *The Messinger Research Group* vid Umeå universitet. Han bedriver forskning om katalysatorer som kan användas för spjälkningen av vatten i den konstgjorda fotosyntesen, och är därmed en bra tillgång till aktuell information om området. Yongqi Liang, en postdoktoral forskare verksam i *The Messinger Research Group*, har också möjlighet att svara på vissa frågor angående forskningen. Viss information i arbetet hänvisas till dessa två muntliga källor.

## 1.4 Teorier

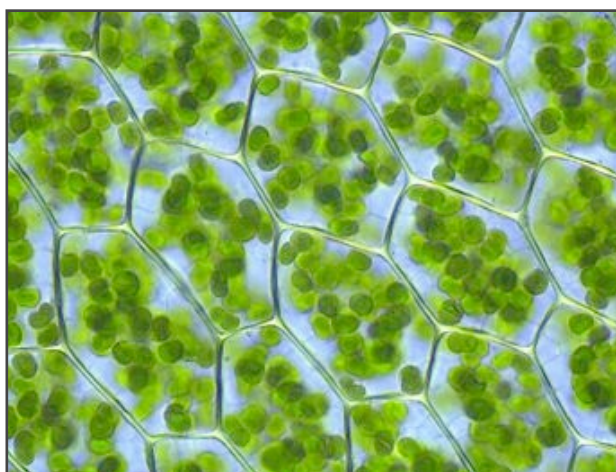
### 1.4.1 Fotosyntes

#### Introduktion

Genom fotosyntesen erhålls för träden viktiga näringsämnen såsom olika sackarider eller stärkelse. Dessa ämnen används för uppbyggnad av växtceller och som energireserv. En annan restprodukt av fotosyntesen är syrgas. Syrgasen är livsviktig för cellandningen hos både djur och växter, trots att växterna är autotrofer. Det vill säga att de producerar sin egen kemiskt bundna energi, som de sedan kan metabolisera med avsikten att förbruka energin som finns bunden. Här kommer syrgasen in som essentiellt ämne växten måste ta in från atmosfären för att kunna tillgodogöra sig av cellandningen.

Den invecklade fotosyntesen använder sig av enkla material som vatten, koldioxid och solljus för att utföra reaktionen. Men dessa är inte allt som behövs för att processen ska kunna ske i växten. En mängd enzymer, organeller, energiöverföringar och andra faktorer påverkar och för fotosyntesen framåt.

I reaktionen nedan är hela processen fotosyntes visad i en mycket förenklad form.



**Fig. 1.1.** Växtceller med tydliga kloroplaster. Inuti dessa tylakoiderna i så kallade granum (ej synliga).  
Källa: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plagiomnium\\_affine\\_laminazellen.jpeg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plagiomnium_affine_laminazellen.jpeg)



Bland växtcellens organeller finns kloroplasterna, som innehåller det för växten nödvändiga färgämnet klorofyll. Kloroplasterna har två skilda membran, ett yttre och ett inre, och detta spelar en stor roll under spjälkningen av vatten. Klorofyll och andra

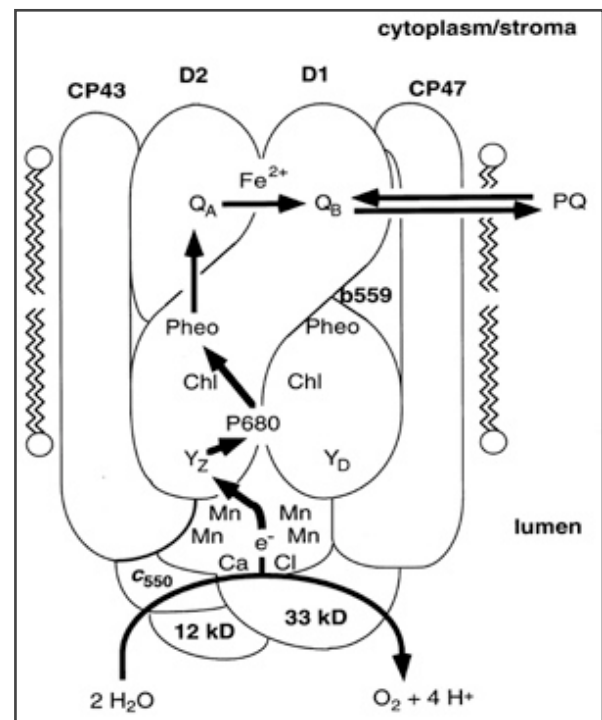
karotenoider, det vill säga organiska färgämnen eller pigment, återfinns i membranet till tylakoider, organeller inuti kloroplasterna. Tylakoiderna ligger i staplar, så kallade granum (se fig. 1.1).

## Photosystem II

En mycket viktig beståndsdel i fotosyntesen är proteinkomplexet *Photosystem II* (PSII) som befinner sig i cellmembranet mellan lumen och stroma, där stora delar av solens energi omvandlas till kemiskt bunden energi (fig. 1.2). Komplexet är relativt invecklat och består av många olika enzymer och proteiner som samverkar. Energin i solens fotoner tas upp av klorofyllmolekyler i PSII som med hjälp av denna kan donera elektroner till en transportkedja som slutligen mynnar ut i bildningen av vätebäraren NADPH. Denna process sker dock långt senare, i proteinkomplexet PSI. Namnen på proteinkomplexen kan förvirra då PSII ligger före PSI i transportkedjan av väte och elektroner. PSII upptäcktes dock efter PSI och fick därmed namnges som det andra av de två.

En mycket viktig funktion för PSII är att spjälka vattenmolekyler för att på så sätt erhålla protoner och elektroner. Elektronerna används som sagt för att skapa kemiskt bunden energi (i proteinet PQ), och protonerna i ett senare skede för att bilda ATP, den primära energibäraren i både växter och djur. Problemet här är dock att spjälkningen av vattnet kräver en mycket hög oxidationspotential, högre än något känt naturligt ämne. Genom oxidationen kommer vattenmolekylen att sönderdelas och beståndsdelarna kan tas vara på. För att kunna oxidera vattnet behövs kraftiga oxidationsmedel och radikaler som med hjälp av donering och acceptering av elektroner "aktiveras" och då kan reagera med respektive ämne. En lång kedja av olika proteiner och ämnen i D1 inuti PSII möjliggör detta utbyte av elektroner bland annat mellan

klorofyllmolekylerna *Chl* och *P680* (se fig. 1.2). P680 refererar till två speciella klorofylldimerer, där P står för "pigment" och siffran 680 för dess absorptionsmaximum i det synliga ljusspektrat. Observera att två olika *Chl* i D1 och D2 särskiljs, det vill säga



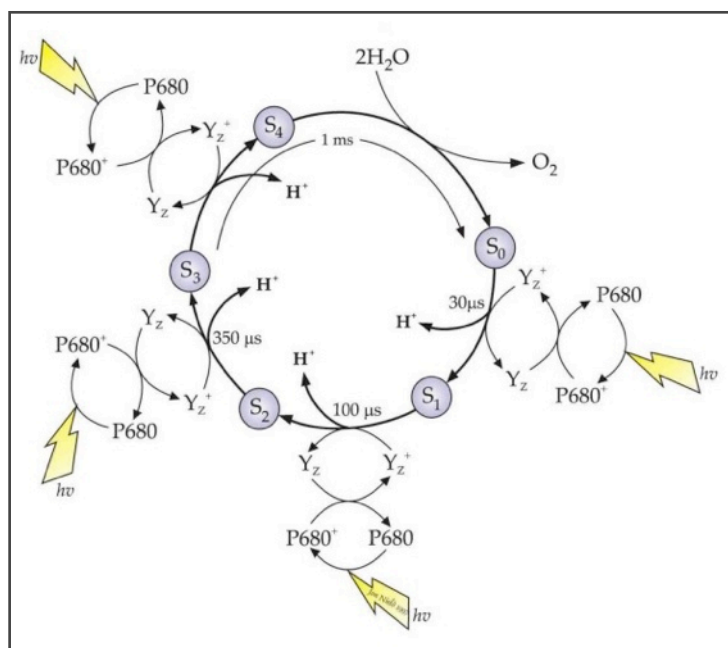
**Fig. 1.2.** *Photosystem 2.* Svarta pilar indikerar elektrontransportkedjan och spjälkningen av vatten.

Källa: [http://bioenergy.asu.edu/photosyn/courses/BIO\\_343/lab/Experiment-II.html](http://bioenergy.asu.edu/photosyn/courses/BIO_343/lab/Experiment-II.html)

Chl<sub>D1</sub> och Chl<sub>D2</sub>. PSI skiljer sig från PSII i och med att det innehåller P700 istället för P680, det vill säga att PSI kan absorbera ljus av en högre våglängd än PSII. Chl<sub>D1</sub> och Chl<sub>D2</sub> har som uppgift att ta emot excitationenergi från solljusets fotoner av LHC-II (Light-Harvesting Complex II), och sedan överföra denna energi till D1 eller D2.

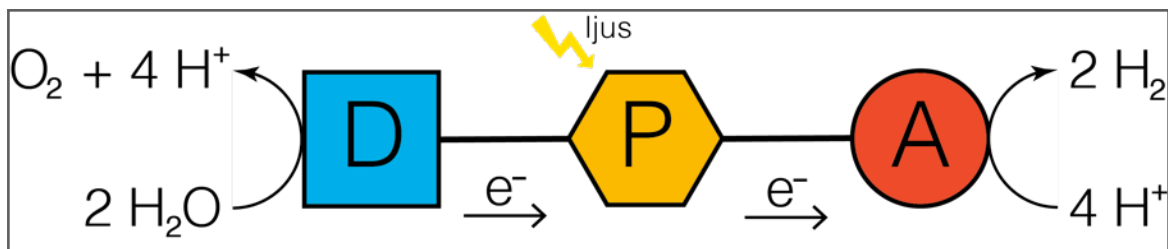
Faktum är dock som sagt att inget av de ämnen som ingår i transportkedjan för elektronerna har en tillräckligt hög, för oss känd, oxidationspotential för spjälkning av vatten. Svaret till hur växterna lyckas med denna reaktion ligger i en annan beståndsdel av PSII, Mn<sub>4</sub>CaO<sub>5</sub> molekylen (de fyra manganatomerna innan Y<sub>Z</sub> i elektrontransportkedjan i fig. 1.2).<sup>[7]</sup>

Vattnet kan spjälkas med hjälp av att Mn-atomerna fångar upp fyra elektroner i en cykel och sedan använder dessa i en samordnad reaktion. På så sätt kan en högre laddning byggas upp jämfört med andra oxidationsmedel. Manganatomerna i molekylen kommer en efter en att oxideras och donerar då elektroner till Y<sub>Z</sub> som senare vidarebefordrar dessa till P680. Hur oxidationerna och reaktionerna mellan Mn<sub>4</sub>CaO<sub>5</sub> molekylen och Y<sub>Z</sub> sker kan redovisas med hjälp av Kok-cykeln (fig. 1.3). Att reaktionerna sker i denna ordning upptäcktes 1969 och förklarades med hjälp av cykeln år 1970. Idag är dock cykeln fortfarande inte fullständig, och vad som sker i steg S<sub>4</sub> är omdiskuterat. Det doneras dock fyra elektroner till Y<sub>Z</sub> under cykelns gång, och tre av dessa elektroner vet man att molekylen Mn<sub>4</sub>CaO<sub>5</sub> donerar. Även väte avges under dessa reaktioner för att utjämna den positiva laddning som kan komma att byggas upp i molekylen och då skulle sabotera andra reaktioner eller oxidationer.



**Fig. 1.3.** Kok-cykeln. Observera laddningsöverföringen från P680 till Y<sub>Z</sub>.

Källa: <http://www.jonniel.com/en/psllimages/KokCycle.html>



**Fig. 1.4.** Den grundläggande energetiken bakom konstgjord fotosyntes. D är en vattenoxiderande katalysator i förbindelse med P, som fångar upp solenergin (ett ljusskördande komplex). A är en vätgasutvecklande katalysator som tar emot elektronerna i slutet av transportkedjan.

### 1.4.2 Konstgjord fotosyntes

Konstgjord fotosyntes innebär att man använder solens energirika strålar för att spjälka vatten och sedan använder den energi som frigörs då vattenmolekylers kemiska bindningar bryts. Denna energi binds sedan i molekyler som skapas av andra beståndsdelar för att forma en produkt av processen, produkter som med dagens konstgjorda fotosyntes till exempel är vätgas eller även elektricitet. Se fig. 1.4 för en generell modell av fotosyntesens energioverföringar.

#### Olika typer av konstgjord fotosyntes och dess produkter

Det finns idag ett flertal varianter av konstgjord fotosyntes. Dessa särskiljs exempelvis av vilka material som krävs och används i processen, vilka produkter som erhålls och även vilken typ av katalysator för vattenspjälkningen som används. Produkter som erhålls genom konstgjord fotosyntes kan vara allt från enkla alkaner, alkoholer eller andra kolväten, vätgas, sackarider (kräver dock längre reaktionskedja för färdiga produkter) och andra nyttoämnen. Värdet på exempelvis bränslen som vätgas kan komma att öka markant i framtiden, och dessa är även relativt enkla att framställa med syntetisk fotosyntes, åtminstone relativt till andra mer invecklade ämnen.

Redan 1874 förutspådde författaren Jules Verne produktionen av vätgas som bränsle. I boken *Den hemlighetsfulla ön* utgiven samma år skriver han att vatten en dag troligtvis kommer att användas som bränsle, att beståndsdelarna väte och syre, var för sig eller tillsammans, kommer att utgöra en outtömlig källa av energi. Jules Verne var en man med en otrolig förmåga att förutsäga framtiden och förutspå ny teknik. Bland annat skrev han både om resor till månen och avancerade ubåtar, årtionden innan de kom att existera i verkligheten. På samma sätt har han alltså för nästan två hundra år sedan redan sagt sig veta om denna användning av vätgasen.<sup>[8]</sup>

Också i naturen använder sig vissa organismer av en process inte helt olik fotosyntesen för att med hjälp av solens energi skapa vätgas. Denna process har främst observerats bland cyanobakterier (dvs. blågröna alger). Under försök med cyanobakterier, då dessa

anpassats till mörker i frånvaro av koldioxid, producerade dessa vätgas när de utsattes för ljus. Reaktionen var här anaerob på grund av bristen på syre och koldioxid. Man vet alltså att vissa organismer tillhandahåller enzymer som, genom att kombinera protoner och elektroner, möjliggör produktionen av vätgas. Enzymet i fråga kallas hydrogenas, och indikationer om dess existens efter försöken med grönalger gäckade forskarna för 60 år sedan. Senare, efter 40 år, lyckades man få fram renad hydrogenas från en encellig grönalga (*Chlamydomonas reinhardtii*).<sup>[7]</sup> De här enkla organismernas processer för att skapa vätgas är ett bevis på hur många variationer det finns av vattenspjälkande reaktioner i naturen. De konstgjorda processerna kan alltså även dessa komma att bli lika mångfaldiga.

Med dagens framtidsutsikter riktar man troligtvis in sig på en användning och återbildning av vätgasen som viktig energikälla. När man sedan har tekniken och vetandet för ytterligare varianter av fotosyntes, som exempelvis bildandet av kolhydrater och energibärare – troligtvis inom en relativt avlägsen framtid – kan dessa processer också utvecklas. Det första steget är alltså bildandet av enkla bränslen så effektivt som möjligt, för att sedan fortsätta med mer avancerade reaktioner.

### ***Vätgasens framtida värde***

Framtidens industri kommer troligtvis att till viss del utgå från användningen av vätgas på en mängd olika sätt. Även gas som ren energikälla kommer möjligtvis att bli en viktig energikälla till fordon och kraftverk, då gaser är lätta att komprimera och oftast inte heller är i behov av en viss temperatur för enkel transport. Gaser som vätgas kan sedan användas i en mängd olika processer. Om vätgasbilen trots de motsättningar denna modell möter klarar av att etableras på en bredare marknad i antingen konkurrens eller samklang med bensin- och elbilar, kan den konstgjorda fotosyntesen som effektivt producerar vätgas bli en stor tillgång i framtidens energiproduktion.

Det finns dock viss kritik mot ett samhälle byggt på användningen av vätgas. Vissa menar att en ekonomi byggd på vätgas inte kommer att hålla under några längre tidsramar på grund av flera faktorer. En av dessa faktorer är tillgången på den energi som behövs för att skapa vätgas genom exempelvis elektrolys, och efterföljande steg som krävs för att bilda vätgas som är passande för användning som bränsle. Enligt Ulf Bossel, en frilansande konsult för hållbar energi, är energiförlusterna allt för stora från ett steg till nästa i produktionen av vätgas genom elektrolys. Han menar att upp till 75% av energin går förlorad i denna process, energi som slösas bort på grund av ineffektiva produktionsmetoder och grundläggande fysikaliska principer. "Runt fyra förnybara kraftverk måste byggas för att leverera effekten av ett [fossilt] kraftverk till stationära eller mobila



konsumenter via väte och bränsleceller”, skriver Bossel i sin avhandling, “Does a Hydrogen Economy Make Sense?”, enligt Lisa Zyga. På grund av dessa energiförluster och den kostnad som uppstår genom den ineffektiva produktionskedjan kan vätgasen komma att göra mer skada än nytta i ett framtida samhälle konstruerat kring användningen av förnybar energi. Enligt Bossel bör just denna energi, producerad genom miljövänliga och outtömliga metoder (exempelvis vind-, sol- och vattenkraft, vilkas livslängd anses vara extremt långvarig), användas för att driva de fordon och samhällen som vätgasen är planerad att försörja med bränsle. Genom att göra detta ska en stor del av energiförlusterna istället användas som just bränsle, istället för att stråla ut som exempelvis värme under produktionen av vätgas. Ett andra argument mot produktionen av vätgas genom elektrolys är behovet av vatten detta medför. Vatten kommer enligt Bossel bli en bristvara i framtidens samhällen, och bör därför inte användas till ändamål som kan täckas av andra energiformer. Bristen på vatten är redan idag en central fråga i globala relationer, och en markant ökning av vattenanvändning i västvärlden på grund av infrastruktur byggd på bränslen som vätgas kan göra att efterfrågan och användningen av vatten ökar ytterligare. Bossel menar också att energikostnaderna för transport av vätgas även leder till en förlust av genererad elektricitet. Vätgasen måste komprimeras och kondenseras för att maximera transportvärdet och detta ökar energikostnaderna markant, till och med över kostnaderna för transport av exempelvis naturgas eller olja genom pipelines eller via fordon.<sup>[9]</sup>

### ***Katalysatorer***

Genom användningen av olika former av katalysatorer för till exempel vattenspjälkningen kan man särskilja vissa former av konstgjord fotosyntes från andra.

Används en *homogen* katalysator är denna i samma fas som reaktanterna. Det vill säga att om katalysatorn är i vätskefas, är reaktanterna också detta. Dock särskiljs faser från olika tillstånd (fast, flytande, gas), vilket gör att faser kan beskrivas med mer frihet. Blandar man till exempel olja och vatten som inte kommer att lösas i varandra (dipol resp. ej dipol) befinner sig båda ämnen i två olika vätskefaser, men samma tillstånd, det vill säga flytande. Homogena katalysatorer är alltså i samma fas som reaktanterna, och oftast i samma vätskeblandning eller gas. Observera att katalysatorn och reaktanterna inte måste befinna sig i exempelvis två olika gas- eller vätskefaser, utan Homogena katalysatorer kan också vara lösta i samma vätska som reaktanterna och på så sätt ha större aktiv yta. Med aktiv yta menas det område av katalysatorn som påskyndar den aktuella reaktionen. Homogena katalysatorer sägs dock vara mer komplicerade att använda och tillverka, och är även mindre stabila då dessa exempelvis lättare oxideras under fel omständigheter.

En *heterogen* katalysator befinner sig i motsats till homogena katalysatorer inte i samma fas som reaktanterna. Det betyder att om katalysatorn är i fast fas, är reaktanterna i exempelvis flytande eller gasformig fas. Den aktiva ytan blir här ytan av katalysatorn som är i direkt kontakt med reaktanterna, och då oftast utsätts för adsorption. Dessa katalysatorer kan alltså ha en nackdel gentemot de homogena, då de sistnämnda möjligtvis har lättare att genomföra fler reaktioner snabbare tack vare sin större aktiva yta. En mängd fördelar karakteriserar dock de heterogena katalysatorerna. En av de mest betydande är det faktum att dessa katalysatorer i stor utsträckning är uppbyggda av vanliga och lättåtkomliga ämnen, vilket gör att priset på dessa inte höjs på grund av stora transport- eller framställningskostnader. Det gör även att sådana katalysatorer ur miljösynpunkt har en säkrare framtid, då lättåtkomliga ämnen inte kräver samma exploatering och resurser som mer sällsynta material. Heterogena katalysatorer fungerar lättare via elektrokemiska reaktioner, och inom elektrokemin är dessa effektiva katalysatorer.<sup>v</sup>

### **Problem kring konstgjord fotosyntes**

En mängd problem förknippas dock med denna typ av syntetisk process, och sådana användningsområden som avser solenergin har lång väg kvar till dess att de är relativt effektiva och driftsäkra. Problemen inkluderar både tekniska, fysiska och rent biokemiska frågor. De komplexa reaktionerna inom proteinkomplexen som medverkar i naturens fotosyntes är inte helt förstådda, elektrontransport och andra redoxreaktioner behöver kartläggas, och katalysatorer måste designas rätt – för att bara nämna några av de frågor som fortfarande måste lösas innan effektiv konstgjord fotosyntes är en verklighet. En mängd olika vetenskapliga områden samverkar just nu för att lösa problemen med konstgjord fotosyntes, och kommer att behöva fortsätta detta samarbete även i framtiden.

### ***Naturens överlägsna process***

John Turners otroliga framsteg inom den konstgjorda fotosyntesen, då han lyckades framställa ett material som kunde spjälka vatten till vätgas med en relativt hög verkningsgrad, var dock kortvariga goda nyheter för energimarknaden.<sup>vi</sup> Materialet Turner använde sig av bröts ned inom ett par dagar, troligtvis på grund av den stora påfrestningen från exempelvis oxiderande katalysatorer. Naturens självreparerande organiska fotosyntes är här helt överlägsen processen i laboratorium. Även de ämnen som användes i Turners material var relativt sällsynta och inte lämpade för en storskalig produktion, en produktion som utgick från en tillverkningsprocess lik den för datorchip. Dessa faktorer bidrog till att

---

<sup>v</sup> Muntlig intervju med Johannes Messinger, december 2013.

<sup>vi</sup> Se: 1.1.2: Vad innebär konstgjord fotosyntes?

Turners material var mycket olämpligt för en storskalig produktion och användning över hela världen.

Idag består mycket av arbetet med konstgjord fotosyntes av att komma fram till så stabila katalysatorer och ämnen som möjligt, då det är oerhört svårt att kontinuerligt och automatiskt reparera materialet på molekylär nivå, så som det sker i växter och andra organiska användare av fotosyntes. Vi vet idag inte i detalj hur fotosyntesen verkligen fungerar. Precisa och relativt exakta modeller finns, men många faktorer och delreaktioner i processen är inte komplett utforskade. Man vet med viss säkerhet var solens energi lagras, och var den sedan används av växten, men i vissa fall svårt att mer ingående avgöra hur processerna sker.<sup>[7]</sup>

### ***Energimarknadens situation***

Andra problem som sinkar och försvårar tillväxten av en utbredd användning av solenergin är både priset för produktionen av material som utför processerna, och viljan att investera i tekniken. Stora pengar tjänas idag på allt det kol, olja och naturgas som behövs för att hålla igång kraftverk och därmed elförsörjningen. Privata företag gör stora vinster då de utvinner, transporterar och säljer stora mängder fossila bränslen till länder som är i behov av dessa.

ExxonMobil, ett amerikanskt företag som sedan 1999 har varit verksamt inom olje- och gasindustrin, gjorde 2012 en vinst på 45 miljarder dollar, vilket tydligt visar hur oerhört lukrativ denna marknad är.<sup>[10],[11]</sup> Även andra företag i branschen tjänar stora vinster på fossila bränslen, trots den kritik som finns mot deras negativa inverkan på miljö och ekosystem. Elförsörjning och bränslen som bygger på fossila bränslen försvårar alltså inte bara för en ökad användning av solpaneler och liknande, utan är – sina skadliga bieffekter till trots – fortfarande en nästan som outtömlig källa till pengar. Detta tack vare världens enorma behov av bränslen och elektricitet.

Att just kolkraft är den ledande varianten av energiutvinning kan förklaras av en mängd faktorer. Bland annat priset på kol eller olja som används till förbränningen gör att detta kan ses som det billigaste och effektivaste sättet att snabbt producera energi. Andra sätt att producera energi, till exempel kärnkraft, innebär också en mycket hög kostnad för byggandet av lämpliga kraftverk, service av dessa, och även för lagringen av det mycket farliga avfallet. Idag finns det även ett utbrett motstånd mot kärnkraft vilket gör att det ofta innebär stora protester vid byggandet av även moderna och effektiva kraftverk. Då de miljövänliga processerna för alstringen av energi, såsom vind-, vatten-, och solkraft ofta

innebär en risk för investeraren med dagens fluktuationer på energimarknaden kommer dessa troligtvis inte att prioriteras framför andra, mer lukrativa sätt att alstra energi.

Om istället mer miljövänliga energikällor används för att tillgodose samhället med energi kan detta medföra en mycket positiv effekt på exempelvis hastigheten av den globala uppvärmningen. I och med detta kommer vi att förfoga över mer tid att lösa bland annat de tekniska och politiska problemen för en hållbar energiförsörjning. Den konstgjorda fotosyntesen kan förhoppningsvis vara en av de tekniska lösningar som låter oss producera energi eller andra nyttoämnen, såsom vätgas.

### **Det konstgjorda bladet**

Konceptet om det konstgjorda bladet bygger på ett konstgjort material som spjälkar vatten när det utsätts för solljus. Genom att sedan kombinera elektroner och protoner från vattenmolekylen kan materialet skapa vätgas. Syftet med det konstgjorda bladet är att hålla nere kostnaderna för produktion av vätgas och samtidigt skona en miljö under hård påfrestning. Om kostnaderna för det syntetiska materialet är låga kan det lätt produceras och distribueras över hela världen. På så sätt kan många få nytta av materialet på många olika platser runt om i världen. Om det är billigt att producera och inte kräver kostsamma eller sällsynta material bör det inte uppstå några uppenbara svårigheter med att övertala företag eller distributörer att producera och lansera produkten.

Den största utmaningen med det konstgjorda bladet är att sänka kostnaden för produktion och global användning av materialet. Mycket av forskningen som pågår idag riktar sig mot hur katalysatorer och andra viktiga beståndsdelar av materialet ska utformas för att inte kräva sällsynta ämnen eller metaller under produktionen. För ett konstgjort blad som ska skona miljön är det inte hållbart att förstöra en annan del av ekosystemet, genom att uppmuntra utvinning av till exempel sällsynta metaller.

### **The Messinger Research Group**

Forskningsgruppen ledd av Johannes Messinger är verksam på Umeå universitet och samarbetar med flera andra projekt, bland annat gruppen *Artificial Leaf Project*, också på Umeå universitet. Enligt hemsidan är de huvudsakliga uppgifterna för projektet:<sup>vii</sup>

The goal of the artificial photosynthesis projects is the development of an artificial leaf. /.../ My group is responsible for developing and testing water splitting catalysts that are made of abundant and environmentally safe materials.

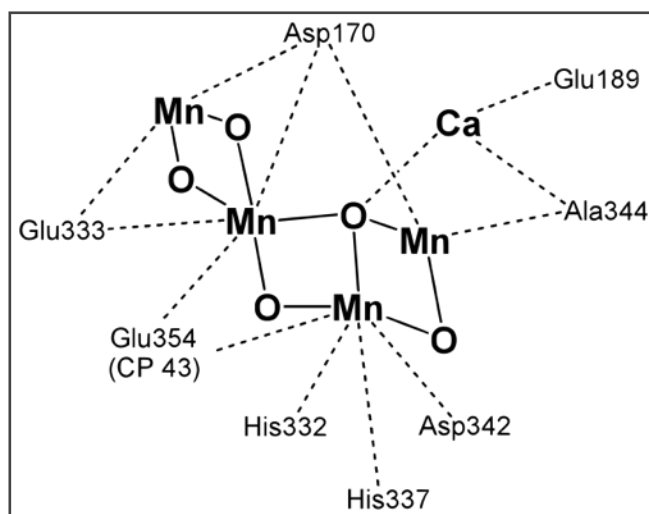
---

<sup>vii</sup> För mer information, se: <http://project.chem.umu.se/jme/>

Det vill säga att forskargruppen arbetar med utvecklingen av lämpliga vattenspjälkande katalysatorer som kan användas i ett konstgjort blad som spjälkar vatten till vätgas då det utsätts för ljus. Resultatet, det konstgjorda bladet, ska kunna användas världen över och med många olika tillämpningar tack vare den låga produktionskostnaden. Denna kostnad ska förhoppningsvis hållas nere genom användning av billiga material och ämnen. En punkt i denna diskussion är att det relativt sällsynta mangan – som idag medverkar i naturlig fotosyntes – ska bytas ut till förmån för vanligare förekommande metaller. Gruppen fick 2011 ett bidrag på 4.4 miljoner euro (40 miljoner kronor) av Knut och Alice Wallenbergs stiftelse i sitt arbete för att utveckla det konstgjorda bladet.<sup>[12],[13]</sup> Tack vare detta forskningsanslag har gruppen bland annat förfogande över flera viktiga maskiner och andra apparater som förenklar forskningen. Underökningar som utförs av forskargruppen sker på Umeå universitet. Under laborationer behandlas exempelvis strukturen av ett vattenspjälkande oxidationsmedel i fotosyntesens PSII,  $Mn_4CaO_5$ -molekylen. Beroende på hur denna ser ut och hur flera av dessa molekyler sitter ihop, kommer ämnets katalyserande förmåga att variera på olika sätt.

### Exempel på undersökning

I naturen förekommer som sagt mangan, *Mn*, i molekylen i proteinet PSII. Dessa manganatomer verkar i kombination med andra atomer och exempelvis proteiner som en mycket effektiv katalysator. Dock förutsätter denna struktur att själva molekylen är omgiven av aminosyror och andra ämnen som möjliggör den katalyserande effekten på vattnet. Att lyckas återskapa dessa komplexa samband är en mycket svår utmaning då de organiska systemen bakom fotosyntesen som sagt är svåra att efterlikna. De fyra manganatomerna och vissa av syreatomerna är placerade i en kubliknande form, där atomerna utgör hörnen (se fig. 1.5). Om manganatomerna byts ut mot exempelvis nickel, kobolt eller kalcium (*Ni*, *Co* och *Ca*) kan den katalytiska verkan av molekylen, och i längden även strukturen på hur de kubiska molekylerna binder till varandra, förändras markant. Frågan är då huruvida katalysen är effektivare eller sämre än tidigare beroende på vilka kombinationer av atomer som används.



**Fig. 1.5.**  $Mn_4CaO_5$  molekylen. Observera den relativt kvadratiska strukturen.

Källa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Photosystem\\_II](http://en.wikipedia.org/wiki/Photosystem_II)

The Messinger Research Group undersöker effektiviteten hos olika former av dessa katalysatorer genom att man analyserar hur strömöverföringar sker genom katalysatorernas reaktioner med vatten. På så sätt kan man relativt enkelt se hur effektiv och stabil katalysatorn är för användning i det konstgjorda bladet. Genom att sedan använda dessa katalysatorer i teknologin kan effekten av väteutvinning ökas. Även stabiliteten av den konstgjorda fotosyntesen är en viktig faktor som tas i åtanke.

Forskargruppen utför även många andra laborationer och experiment av bland annat molekyler och proteiners laddningar (viktigt för studien av katalysatorerna), upptagningen av solljus för olika ämnen, och som sagt även effektiviteten av olika katalysatorer.

## 2. Resultat och analys

### 2.1 Resultat

Konstgjord fotosyntes innebär en mängd fördelar för världens försörjning med bränsle och energi. Det finns ett överflöd av solenergi varav det mesta naturligtvis blir till värmeenergi då solstrålarna träffar jorden. Detta överflöd gör att vi inte behöver använda energi bundet till jorden, utan kan nyttja den källa som i miljontals år har försörjt vår planet med den energi vi lever på. Energi som är bundet till jorden, det vill säga olja, naturgas och andra fossila bränslen, har under lång tid lagrats och är rester av sedan länge utdöda växter och andra organismer. I stora drag kan man säga att denna energi inte hör till vårt ekosystem längre, utan har varit isolerad från atmosfären så länge att ny solenergi har bundits och använts i dess plats. När vi då utvinnet fossila bränslen stör vi det kretslopp där en viss mängd av det solljus som når jorden alltid har "lagrats" oåtkomligt för livet på jorden. Vi släpper ut koldioxid och andra restprodukter då vi förbränner dessa bränslen och får på så sätt ett överskott av växthusgaser.

#### 2.1.1 Det skadliga förnybara

Även andra faktorer (bortsett från miljöförstöringen) gör att utvinningen av fossila bränslen inte är hållbart på lång sikt. Studier visar att flora och fauna runt om platser där det utförs borrhning eller gruvdrift störs mer än förmodat på grund av den mänskliga aktiviteten i området. Metoder som just borrhning och gruvdrift har länge räknats som metoder med relativt begränsad miljöbelastning, och det har ofta antagits att den ursprungliga miljön och ekosystemen som funnits där kan återställas och nästan anta sin gamla form efter en viss tid. Andra mänskliga aktiviteter, såsom röjning och anläggning av storskaliga åkermarker, har ansetts som mer skadliga på grund av de uppenbara och större arealerna som då påverkas. Istället för en liten gruva eller ett borrhål med en borrhningsstation anlägger man hektar efter hektar med åkermark, och detta ger självklart en viss vinkling av frågan. Genom undersökningar har det dock visats att metoder bakom olje-, kol- och gasutvinning gör långt mer skada än tidigare beräknat. Detta visar att även de metoder vi länge har sett som relativt lindriga mot miljön kan skada ekosystem och känsliga habitat i stor utsträckning.<sup>[14]</sup>

Undersökningarna om energikällors miljöpåverkan sträcker sig dock ännu längre. Den allt mer prisade och utvecklade vindkraften har länge varit en av de populäraste förnybara energikällorna. Bakom den rena energin och de lysande framtidsutsikterna finns dock andra faktorer och rapporter som inte stärker den positiva inställningen till vindkraft. För att bygga de ofta långt över 100 meter höga vindkraftverken behövs först och främst

infrastruktur. Vägar måste ibland anläggas för att kunna transportera de oerhört stora delarna till kraftverket, och mark runtom byggnadsplatsen blir påverkad då grunden till vindkraftverket ska anläggas. Skogsavverkning, utgrävningar och erosion är några faktorer som förmodas skada ekosystem och miljö i stor utsträckning. Fåglar och andra djur kan också skadas på grund av de snabbt roterande bladen eller vindkraftverkens störande inverkan.<sup>[15]</sup>

Människor har även antagits kunna bli påverkade av vindkraftverken. Detta ska bero på infraljud (vibrationer) som påverkar vårt balanssinne i innerörat, och som enligt undersökningar ska kunna uppfatta dessa ohörbara störningar i luften. Vindkraftverk sägs ge upphov till kraftigt sådant infraljud, och därmed även påverka människor starkt. Nina Pierpont, en läkare och anti-vindkraftsaktivist som undersökt 10 familjer i skuggan av vindkraftverken, rapporterar att många av dessa människor har fått liknande symptom. Symptomen inkluderar bland annat huvudvärk, tinnitus, yrsel och hjärtrusning. Vissa säger även att de vaknat mitt i natten av "panikanfall", av åkomman som har döpts till *Wind Turbine Syndrome*.<sup>[16]</sup> Om dessa symptom beror på vindkraftverk eller inte återstår att se, men då Pierpont själv publicerat sina teorier utan vetenskaplig granskning bör hennes undersökningar inte ses som bevis för existerande problem. Bland annat undersökte eller mätte Pierpont aldrig nivåerna av infraljud vid de berördas hem. Hon intervjuade även endast 23 personer över telefon, och accepterade anekdotiska uppgifter från ytterligare 15 personer. Detta urval är för begränsat för att kunna dra några koncisa slutsatser.

Enligt Mike Barnard, som i en artikel argumenterar och visar att Pierpont inte har använt sig av en seriös och vetenskaplig process, skriver även att det genomförts 17 större studier om ljudnivåer, infraljud och andra faktorer kring vindkraftverk. Inga av dessa studier genomförda av forskare, akustiker och andra specialister ansåg att Pierponts undersökning håller i trovärdighet i jämförelse med annan forskning om ämnet.<sup>[17]</sup>

Tack vare seriös forskning som genomförts inom området kan teorier som Pierponts fort sållas ut ur andra seriösa projekt. Då motståndet mot vissa typer av förnybar energi i vissa fall är massivt (precis som motståndet till andra energikällor, såsom kärnkraften) är det viktigt att hålla kvar fokus på vad som bör undvikas för en hållbar framtid och vad som är ett nödvändig ont.

### **2.1.2 Konstgjord fotosyntes som ledande teknologi**

Den konstgjorda fotosyntesen kan här komma att revolutionera användningen av energigenererande strukturer. Materialet som syntetiserar produkter av fotosyntesen behöver inte vara skrymmande eller påverka närmiljön speciellt mycket. Materialet kan till



exempel verka som en yta på byggnader, och därmed inte utgöra något hinder för varken människan eller naturen. Då så många ytor som möjligt troligtvis kommer att användas för konstgjord fotosyntes, om denna blir allmänt tillgänglig, blir inte endast enstaka familjer eller grupper utsatta. Så är fallet just nu med vindkraftsparkar och liknande där endast ett fåtal personer i närheten utsätts.<sup>[5]</sup>

Genom globala samarbeten liknande HGP (Human Genome Project<sup>viii</sup>) kan forskare över hela världen samarbeta för att gemensamt nå nya framsteg för den konstgjorda fotosyntesen. Då man enkelt kan dela data eller upptäckter med många andra laboratorier och liknande kan man koncentrera sig på lovande nya tekniska lösningar och effektivare förbättra dagens teknik. Ett sådant samarbete är självklart JCAP som med hjälp av forskarlag över hela USA genomför samarbeten som kraftigt gynnar tekniken.<sup>[18]</sup>

### 2.1.3 Problem kring konstgjord fotosyntes

Ett exempel på hur växtens PSII skyddar sig själv från skada är då den normala färdvägen för elektroner genom D1 blockeras på grund av exempelvis skador i proteiner. Om inga elektroner kan reducera det mycket reaktiva P680<sup>•+</sup> genom att exempelvis doneras från Y<sub>Z</sub>, som i sin tur får elektroner från Mn<sub>4</sub>CaO<sub>5</sub> molekylen, kan det starka oxidationsmedlet istället skada många andra proteiner och molekyler i sin närvaro. Genom att PSII istället aktiverar vanligtvis inaktiva kofaktorer kan dessa donera elektroner till P680<sup>•+</sup> och PSII undviker skada.<sup>ix</sup> På grund av dessa invecklade och länge förfinade mekanismer är det svårt att skapa ett icke organiskt material som klarar av samma påfrestningar. Faktum är att D1 byts ut genom en specifik reparationscykel ungefär var 20-30 minut om det utsätts för kraftigt solljus i vissa organismer.<sup>[7],[19]</sup> Hur liknande processer ska efterliknas med syntetiska reaktioner är fortfarande en fråga som saknar ett tydligt svar.

Ytterligare faktorer som står mellan dagens teknik och effektivt fungerande syntetisk fotosyntes inkluderar även svårigheterna att finna en katalysator som leder till en stabil oxidering av vattenmolekyler. Många ämnen som idag finns till förfogande leder exempelvis oftast till skador på materialet de samverkar med, eller fungerar inte fördelaktigt. Som med de kraftiga oxidationsmedel (dvs. radikaler) i naturens system för vattenspjälkning är det svårt att utföra dessa reaktioner utan skador på exempelvis de ämnen som ska fånga upp solenergin. Oxideras andra ämnen kan det exempelvis leda till

---

<sup>viii</sup> För mer information, se: <http://www.genome.gov/10001772>

<sup>ix</sup> "En *kofaktor* är en kemisk förening som binder till enzymer för att bidra till dess katalytiska förmåga." Wikipedia (2014).

att processen helt avstannar eller att oväntade ämnen bildas. Effektiva och stabila system får inte ha några sådana brister, om inte en mekanism som kan reparera sådana skador finns tillgänglig. Då den naturliga fotosyntesen lägger sin energi på att reparera befintliga system, som exempelvis PSII, istället för att helt byta ut dem kan detta vara rätt metod även för konstgjord fotosyntes.<sup>[19]</sup>

En annan faktor som står i vägen för ett färdigt koncept av konstgjord fotosyntes vid exempelvis JCAP är uppfångandet av solens energi. I naturen sköts detta av "antennerna" i växtens klorofyll (LHC – Light-Harvesting Complex), där klorofyllmolekyler exciteras av solljusets fotoner och sedan vidarebefordrar denna laddningsskillnad (det vill säga elektronerna) till andra delar av fotosyntesens reaktionskedja. I laboratoriet är denna process inte lätt att efterlikna, och kemiprofessor Nate Lewis (Caltech i Pasadena, Kalifornien) som arbetar vid JCAP är en av de pionjärer som ägnar sig åt denna forskning. För få en så effektiv energiabsorbering som möjligt måste materialet som utför den konstgjorda fotosyntesen vara svart. På så sätt absorberas så mycket som möjligt av solens strålar, till skillnad från växterna vars gröna färg bland annat inte kan ta emot ljus ur den gröna delen av det synliga ljusspektrat. "Växter har fel färg för att vara optimala maskiner för energikonversion" säger Lewis, och på grund av detta och många andra faktorer är växternas maximala energiupptag (från solenergin) endast cirka 10 procent av ljusintensiteten en solig och vacker dag. För att förbättra växternas konstruktion och process måste den konstgjorda fotosyntesen kunna ta upp ljus från majoriteten av det synliga spektret. Enligt Lewis uppstår här problem med de LHC-komplex man har skapat. Till exempel fungerar ljusabsorberare för den röda delen av ljusspektret i ett annat pH än de som fångar upp ljus i den blå delen.<sup>[20]</sup>

Enligt Lewis och många andra forskare är också växternas metoder att använda vanligt förekommande metaller och ämnen i fotosyntesen en fråga som kräver svar. Ingen konstgjord fotosyntes kommer att revolutionera världen om tekniken bygger på sällsynta och dyra metaller. Målet är att skapa billigare energi, inte ännu en marknad för dyrare. Johannes Messinger (Umeå universitet) säger att det konstgjorda bladet bygger på att man kan använda mer rikligt förekommande ämnen såsom exempelvis naturens egna lösning mangan, eller metaller som nickel eller järn.<sup>x</sup> På så sätt görs det konstgjorda bladet billigare och det blir lättare att använda världen över. Lewis är även säker att vi kan effektivisera naturens process ytterligare, om vi bara förstår hur allt hänger ihop och hur de invecklade reaktionsvägarna i växten ser ut.

---

<sup>x</sup> Se: 2.2.4: *Det konstgjorda bladet*

## Etablering på den globala spelplanen

Genom att tekniken blir billigare och lättare att sprida globalt kommer de framsteg som görs inom forskningen troligtvis att ge utslag på världsmarknaden. Finns det en förnybar energikälla som är billig och effektiv är tillgången på intresserade företag och distributörer sannolikt inte särskilt begränsad. Det största problemet den konstgjorda fotosyntesen måste övervinna är troligtvis den lukrativa marknaden för fossila bränslen. Eftersom denna marknad dock kan försvagas kraftigt i framtiden på grund av allt dyrare metoder att utvinna det bränsle som finns i marken, kan fler förnybara energikällor ha en allt större chans att erbjuda konkurrens. Det konstgjorda bladets är här ett lovande koncept för att uppnå målet att sprida tekniken till utvecklingsländer utan tillgång till andra förnybara energikällor. Priset på förnybar energi sjunker stadigt och kan i framtiden komma att bli billigare än energikällor som idag är mycket lukrativa.<sup>xi</sup> På så sätt öppnas även möjligheter för dessa tekniker att ytterligare befästa sin position på energimarknaden.

### 2.1.4 Användningen av konstgjord fotosyntes

Konstgjord fotosyntes kan idag användas för att exempelvis spjälka vatten och utföra liknande grundläggande reaktioner. Man har genom metoder som bland annat fotoelektrokemi kunnat bilda vätgas med hjälp av katalysatorer som till exempel titaniumdioxid (TiO<sub>2</sub>), som trots sin uppenbara funktion i dessa reaktioner inte är lämpliga för storskalig produktion eller global spridning av den konstgjorda fotosyntesen.<sup>[21]</sup> Sällsynta metaller som titan, platina och iridium måste ge plats åt billigare och mer lättåtkomliga metaller som järn, nickel och mangan (används av naturlig fotosyntes i PSII). Fördelarna med de billigare metallerna är uppenbara: billigare produktion- och materialkostnader och en stabilare framtidsutsikt för de syntetiska material där metallerna ingår. Det finns dock även nackdelar med dessa metaller som inkluderar både instabila katalysatorer och en längre väg till väl fungerande fotosyntes. Billigare och mindre sällsynta metaller är det svårt att skapa stabila katalysatorer med, som behövs just för vattenspjälkningen och elektrontransporten genom de verksamma molekylerna eller proteinerna.<sup>xii</sup>

Trots att konstruktionen och forskningen om katalysatorer är av stor vikt för den konstgjorda fotosyntesen är detta ändå inte det enda problemet som kvarstår för att i framtiden kunna lansera effektiv syntetisk fotosyntes. Anledningen till att de vetenskapliga framgångarna som är nödvändiga för att skapa effektiv och globalt använd konstgjord

---

<sup>xi</sup> Se <http://theenergycollective.com/zachshahan/229481/solar-power-s-massive-price-drop-graph>

<sup>xii</sup> Muntlig intervju med Johannes Messinger, december 2013.

fotosyntes är så oerhört komplexa, beror på att genombrott måste nås på en mängd olika teknik- och vetenskapsområden. De viktigaste av dessa områden är: ljusskördning (uppfångandet av solenergin på molekylär nivå), laddningsseparation, katalys, halvledare, nanoteknik, syntetisk biologi och genteknik, fotokemi och fotofysik, fotoelektrokemi, reaktionsmekanismer samt tekniken för att utveckla nödvändiga anordningar. De tidigare nämnda exemplen på faktorer som hindrar utvecklingen tillhör bland annat områdena laddningsseparation, katalys, fotokemi och -fysik och reaktionsmekanismer. Många problem är som sagt mycket komplexa och tillhör inte bara ett eller ett fåtal vetenskapsområden.<sup>[5]</sup> En mängd av de områden man utvecklar till förmån för den konstgjorda fotosyntesen kan idag redan användas med varierande effektivitet och stabilitet. Ett exempel är att vi har förmågan att spjälka vatten med hjälp av fotoelektrokemi, men då denna teknik inte än är redo att implementeras i större projekt eller global marknadsföring kan den därmed inte påverka industri eller energimarknad i någon större grad. Projekt som dessa används och utvecklas dock även på andra håll och i andra sammanhang, vilket ökar möjligheterna till samarbeten mellan olika forskningslag och därmed vetenskapliga genombrott.<sup>[22]</sup>

## Det konstgjorda bladet

“Genom att konstruera en enkel anordning uppbyggd av rikligt förekommande ämnen, skapar det konstgjorda bladet en möjlighet för ett billigt och väldistribuerat system som omvandlar solenergi till bränsle och använder systemteknik och tillverkning utan höga kostnader.”

(Egen översättning av Nocera, 2011) <sup>[19]</sup>

Enligt Daniel G. Nocera (vid Harvard University) kan det konstgjorda bladet vara en mycket lovande lösning på de problem samhället ställs inför, det vill säga om materialet som konverterar solljus till energi är billigt och enkelt att framställa. Komplicerade produktionsprocesser och låg tillgång på nödvändiga material gör endast kostnaden högre och begränsar därmed användningen och spridningen av tekniken.<sup>xiii,[19]</sup>

Då de solceller som används världen över idag har en stor brist i och med att de inte genererar någon energi alls nattetid, och på så sätt måste ersättas av andra – kanske mindre miljövänliga – energikällor då solen inte räcker till, vill forskare bakom det konstgjorda bladet motverka denna brist. Genom att det konstgjorda bladet även är verksamt under natten eller vid solbrist – precis som då växterna utför processer under natten – vill man kunna kringgå periodiska energiställ, då ingen energi genereras av

---

<sup>xiii</sup> Idéer finns om att använda sällsynta metaller som titan eller iridium i konstgjord fotosyntes.

solceller i mörker. Det konstgjorda bladet betraktas ofta som en framtida kanske mycket viktig källa för bränslen som vätgas. Vätgasen har en fördel gentemot elektricitet då gasformiga bränslen är lättare att hantera och lagra än elektricitet. Batterier kopplade till solceller har idag inte tillräcklig kapacitet för att mäta sig med solcellernas produktion av elektricitet under längre perioder.

## 2.2 Analys

I teorin finns det många möjligheter för att konstgjord fotosyntes ska fungera och kunna ge oss en mängd olika nyttoämnen och bränslen, men i praktiken är frågan inte lika enkel. Många faktorer påverkar de komplicerade processerna bakom fotosyntesen och alla dessa är idag fortfarande inte helt utredda. Forskningen går framåt men då växternas mekanismer och biologiska processer är invecklade kan det i vissa fall bara spekuleras kring vissa funktioner eller reaktioner. Under det senaste årtiondet har forskare dock lyckats kartlägga oerhört komplexa proteiner som exempelvis PSII, som är en del av växternas fotosyntes. Dessa naturens väl försvarade hemligheter har varit till stor nytta för att dechiffrera de komplicerade processer som proteinerna genomgår vid fotosyntesen.<sup>[19]</sup>

En faktor som försvårar för långvarig och kostnadseffektiv konstgjord fotosyntes är växternas förmåga att reparera de organeller, molekyler samt proteiner som samverkar i reaktionen. Systemen som utför fotosyntesen sätts under stark press då de nästan konstant fångar upp energirika fotoner eller elektroner, transporterar laddningar av olika polaritet och inte minst utför oxidationer med mycket reaktiva slutprodukter. Ett exempel på detta är det faktum att radikaler skapas under vattenspjälkningen i PSII, det vill säga molekyler (eller atomer) med oparade elektroner. Dessa är mycket reaktiva ämnen och oxiderar mycket lätt andra molekyler, vilket är farligt för organismen de bildas i. Går något fel i processen kan dessa alltså lätt reagera med fel ämnen och leda till skada.<sup>[19]</sup>

Oxidationsmedlet  $P680^{*+}$  bildas under den fotokemiska reaktionsserien då klorofyllmolekyler i proteinet D1 i PSII mottar elektroner, och därmed bildar ett mycket kraftigt oxidationsmedel.  $P680^{*+}$  har den högsta kända oxidationspotentialen i naturen (cirka 1.25-1.3V), men har inte en oxidationspotential kraftig nog att direkt utvinna elektroner ur vattenmolekylen i lösning, det vill säga skapa radikalen  $HO^{\bullet-}$  (kräver cirka 2V).<sup>[7]</sup> Detta vittnar om vilka krafter som krävs för att spjälka vattnet och under vilken press övriga ämnen i PSII står.<sup>[7]</sup>

### 2.2.1 Faktorer som hindrar konstgjord fotosyntes

Enligt Daniel G. Nocera (Massachusetts Institute of Technology) ligger nyckeln till att framgångsrikt återskapa fotosyntesen i förmågan att uppnå effektiv soldriven vattenspjälkning. Just katalysatorn för denna spjälkning – samt de tidigare nämnda LHC-komplexen – är områden även Nocera understryker som centrala för den konstgjorda fotosyntesens framgång.

“Analyser av energetiken<sup>xiv</sup> bakom omvandlingsprocessen för solbränslen [läs: vätgas] visar att det är vattenspjälkning och inte produktionen av kolhydrater som är hjärtat i lagrandet av solenergi.”

(Egen översättning av Nocera, 2011) <sup>[19]</sup>

För att lagra solenergin så effektivt som möjligt efter naturens egen process måste alltså spjälkningen av vatten ligga i fokus, då det är här den viktigaste energiöverföringen sker. Förstår vi inte denna process fullständigt är potentialen att kunna nyttja fotosyntesen som energiproducerande metod relativt låg. Växterna skapar alltså först vätgas, men för att effektivt kunna lagra den energi som finns i bindningarna kombinerar de vätgasen med koldioxid och bildar på så sätt kolhydrater. Nocera nämner även att naturlig fotosyntes opererar med naturliga vattenkällor, vid normala temperaturer och tryckförhållanden, samt vid relativt neutrala pH-värden. Sedan tillkommer självklart naturens användning av frekvent naturligt förekommande ämnen.<sup>xv</sup> Dessa förhållanden är motsatsen till förhållanden som används vid nutida vattenspjälkande metoder. Dessa utför vattenspjälkning vid mycket hårda eller onaturliga förhållanden, och använder ofta sällsynta eller svåråtkomliga material.<sup>[19]</sup>

Även de områden som behandlas av forskare som Nate Lewis (Caltech) och Johannes Messinger (Umeå universitet) är viktiga för att den konstgjorda fotosyntesen ska kunna flyta på så effektivt som möjligt. Ämnen som absorberar solljuset är essentiella (*Light Harvesting Complex*, LHC), precis som de katalysatorer som ger oss den vätgas som produceras. Kan dessa faktorer effektiviseras kommer den konstgjorda fotosyntesen troligtvis att ha en hög verkningsgrad och på så sätt kommer den att bli en självklar källa till energi.

### Fördelar med omfångsrik forskning

Då det krävs framsteg inom så många skilda områden för att utveckla stabil och effektiv syntetisk fotosyntes är det inte överraskande att utvecklingen är långsam men mycket

---

<sup>xiv</sup> Dvs. omvandlingen av energi.

<sup>xv</sup> Översatt: *Earth-abundant materials*.

nyttig för vetenskapen och samhället. Utvecklingen av projekt som det konstgjorda bladet kan mycket väl medföra positiva förändringar inom vetenskapen och tekniken bakom, då ny forskning kan leda till genombrott i andra överlappande projekt.

### **2.2.2 Varför lanseras inte konstgjord fotosyntes?**

Trots de uppenbara fördelar som den syntetiska fotosyntesen medför har den idag ingen tydlig plats på världsmarknaden för energiproduktion. Dyra beståndsdelar för produktion av material, otillräcklig och ej pålitlig teknik samt en mängd andra faktorer gör den konstgjorda fotosyntesen för närvarande till en förlustaffär i många sammanhang. För att kunna påverka energimarknaden positivt måste tekniken troligtvis vidareutvecklas och bli vinstdrivande. Finansiellt intresse påverkar många av dom beslut som görs på energimarknaden, och exempelvis är kolkraft ett av de billigaste sätten att producera elektricitet (faktum är dock att sol- och vindkraft snart kan vara billigare i vissa delar av världen).<sup>[23]</sup> På grund av denna kostnadsskillnad mellan de olika metoderna att generera elektricitet påverkas alltså vilka av metoderna som blir gynnade. För att långsiktigt påverka kostnaden för konstgjord fotosyntes måste materialet göras stabilt, livslängden ökas och produktionskostnader sänkas, för att nämna några faktorer som idag hindrar storskalig etablering av konstgjord fotosyntes. Det finns dock en hel del medel till forskning inom ämnet, och idag pågår många projekt för att lösa uppgiften att effektivisera syntetisk fotosyntes.

Forskningen bakom den konstgjorda fotosyntesen vinner allt mer mark, och vetenskapen måste alltså först arbeta med att förstå och framgångsrikt kunna manipulera hela eller delar av naturens process, för att sedan överföra denna kunskap till material som kan komma att förändra energimarknaden avsevärt. Innan några betydande framgångar har gjorts (inom förenkling av katalysatorer, tillverkning, formgivning, etc.) kommer många företag som sagt troligtvis inte att vara speciellt intresserade av en produkt som idag inte kan garantera driftsäkerhet och enkelhet. Det har tagit lång tid för sol- och vindkraft att nå betydande andelar av världens energiproduktion, och det kan dröja lika länge innan konstgjord fotosyntes har kommit ikapp på världsmarknaden. Med hjälp av konstgjord fotosyntes kommer vi alltså troligtvis att kunna lösa problem relaterade till skadlig utvinning av fossila bränslen och miljöförstöring, dock kanske endast om teknologin når en högre nivå och kan distribueras globalt. Det vill säga att den konstgjorda fotosyntesen genom en positiv inverkan på energimarknaden genom billigare och förhoppningsvis effektivare framställning av energi och bränsle kommer att bidra till en större prioritering av förnybar energi, och en avveckling av allt dyrare fossila bränslen.

Vindkraft och vattenkraft är ökända för sin starka påverkan på sin närmiljö genom exempelvis sin skrymmande storlek. Detta faktum ger energikällor som dessa svårigheter att etablera sig på många platser, då människor ofta inte vill leva med sådana maskiner i närheten.<sup>xvi</sup>

Det kan finnas en föråldrad bild av konstgjord fotosyntes, på grund av den teknik som används för att generera elektricitet med hjälp av solen. Konstgjord fotosyntes i formen av fotovoltaik (det vill säga solceller) som med hjälp av skillnad i valenselektroner mellan två lager genererar en elektrisk ström då solljuset träffar solcellens yta, används redan på energimarknaden. Denna teknik har utvecklats sedan man upptäckte vissa metallers fotokonduktiva egenskaper i slutet av 1800-talet.<sup>xvii</sup>,<sup>[24]</sup> Solceller ger oss en möjlighet till miljövänlig elektricitet med relativt liten åverkan på omgivningen. De är dock enligt definitionen inte en form av konstgjord fotosyntes då solceller inte syntetiserar nya ämnen enligt principerna i naturlig fotosyntes, utan endast levererar "fria" elektroner som kan användas direkt i elnätet.

### **Vind- och solkraftens inflytelserika historia**

En annan faktor kan dock komma att påverka användningen av hållbara energikällor inom en snar framtid. Efter andra världskriget föll priset på bensin starkt och intresset för exempelvis vindturbiner, som då användes för generation av elektricitet, minskade på grund av detta. Det var enklare och lättare att använda fossila bränslen istället för att investera stora pengar i vindkraft som fortfarande hade långt kvar till sin tekniska högtid. Populariteten av förnybara energikällor fluktuerar alltså med priset på de fossila bränslena. Människor blir mer benägna och positiva gentemot exempelvis sol- och vindkraft då priset på bland annat bensin gör att man avskräcks från att använda detta. Samhället försöker helt enkelt hitta nya, billigare lösningar på problemet. Då dagens samhälle troligtvis kommer att nå ett mycket högt pris på bensin inom en relativt närstående framtid kan även intresset för alternativa energikällor komma att skjuta i höjden. Depåerna av olja och andra fossila bränslen blir mindre och mindre, och samtidigt blir det allt dyrare att utvinna dessa med nya metoder. Detta höjer priset på bensinen vi tankar våra bilar med, och därmed påverkas många direkt då tillgången på olja sjunker. Mindre pengar i plånboken gör till slut att människor försöker sätta sin tro på andra energikällor som kan erbjuda mer samvetsgranna bränslen till ett bättre pris.<sup>[25]</sup>

---

<sup>xvi</sup> Se: <http://www.friavindar.se/>, hemsida för motståndet mot vindkraft på Holmön, utanför Umeå.

<sup>xvii</sup> Senare tilldelades bl.a. Albert Einstein Nobelpriset för sin forskning om fotoelektrisk effekt, år 1921.



Då vindkraften har funnits länge och även genererat mekanisk kraft i många århundraden, har denna energikälla troligtvis fått sin nisch i samhället och därmed även en roll att fylla. Vindkraften har sedan sent 1800-tal levererat ström i mer eller mindre allmänna syften, och principen är troligtvis rent mekaniskt enklare att förstå än de komplicerade kemiska och fotokonduktiva principerna bakom modernare fotovoltaik.<sup>[26]</sup> Redan tidigt i människans historia använde man vindens energi i väderkvarnar och liknande mekaniska uppfinningar, som inte skiljer sig mycket från dagens vindkraftverk som driver generatorer. I väderkvarnar vrids kvarnstenen av vinden, i vindkraftverk generatorns spole. Trots att man alltså länge har kunnat använda solens energi för att exempelvis försörja sig med värme på olika sätt, är metoderna för att framställa elektricitet med hjälp av solen så komplicerade att steget från värmeenergi till elektricitet inte kunnat övervinnas lika snabbt.

I dagens samhälle har solkraften dock mest stöd av allmänheten, enligt en studie genomförd år 2011 av Ipsos MORI, ett ledande brittiskt marknadsundersökningsföretag. Näst efter solkraft i popularitet finns vindkraften som också åtnjuter hög popularitet, och den tredje mest populära energikällan är vattenkraft.<sup>[27]</sup> Samtidigt pekar dock statistik på att priset för produktion av de flesta förnybara energikällorna stadigt sjunker. Detta bör visa på en ökning i popularitet för förnybar energi, men faktum kvarstår att fossila bränslen är det mest etablerade sättet att generera energi i dagens samhälle. Frågan är då hur konstgjord fotosyntes ska ha en chans på världsmarknaden, om inte relativt välkända och allt billigare energikällor har kunnat etablera sig tillräckligt för ett skifte bort från de fossila bränslena. Många faktorer pekar på att denna nya metod att generera bränslen och därmed energi helt enkelt behöver mer tid för att utvecklas och övervinna sina brister. Sol- och vindkraft har behövt många decennier för att komma till den position på energimarknaden de är vid nu, och samma faktum kanske är verkligheten för den konstgjorda fotosyntesen. I åtanke bör dock vara att bensinen stadigt har ökat i pris sedan millennieskiftet, och därmed har samhället en ny anledning att visa intresse för allt billigare och effektivare förnybar energi. Därmed kan även den konstgjorda fotosyntesen – trots sin sena utveckling – ha en chans att etablera sig framgångsrikt på världsmarknaden.

Utvecklingen av vindkraft leder även indirekt till att motståndet mot vindkraften ökar. Då intresset för investering i den allt mer effektiva metoden att alstra elektricitet ökar, kommer även avkastningen att stiga i höjden. Det gör att fler företag är redo att satsa på vindkraft och vill då bygga vindkraftsparker i gynnsamma områden. Samtidigt påverkas de boende i området av bygget och tillvaron av kraftverken. Eftersom vissa förnybara energikällor möter sådant motstånd från de som drabbas kommer det i framtiden behövas en större allmän acceptans av metoderna bakom förnybar energi. Det kommer att finnas ett större behov av "grön" elektricitet och fler kommer att behöva leva med vindkraftverk eller

solparker tätt inpå sina hem. Samhället har troligtvis helt enkelt inte råd att förlora möjligheten till sådan energiproduktion på grund av obevisade symptom och problem som oftast är lätta att undvika.<sup>xviii</sup>

### **Andra lösningar på energiproblemen**

Idag finns det en mängd idéer för hur vi ska lösa miljökrisen och energiproblemen. Att den konstgjorda fotosyntesen är en av många visioner om framtidens energikällor är just en begränsande faktor för forskningen och utvecklingen. Då kapital och forskning delas upp på många olika ämnen går utvecklingen långsammare än om en vision vore den "rätta". Idén om att all forskningsverksamhet ska rikta in sig på just en metod att alstra ström är dock extremt orealistisk. Både ur ett vetenskapligt och ett logiskt perspektiv bidrar all seriös forskning nästan uteslutande till fördelar och ny kunskap för samhället. Genom att forskningen kring nya energikällor sprids ut ökar kunskapen stadigt på många olika områden samtidigt. Därmed kan områden även direkt eller indirekt hjälpa varandra att lösa problem, öka förståelse och liknande. Idag dominerar flera olika metoder att generera energi och tack vare detta har både konsumenter och samhälle möjlighet att stödja den metod de anser överlägsen. Det kommer alltid att finnas problem med alstringen av energi, och fördelarna med olika metoder överväger troligtvis nackdelarna med en enda metod. Vattenkraft kan till exempel inte användas på platser där vattendrag och vattenförsörjning är känsliga för mänskliga ingrepp eller infrastruktur, där samtidigt vindarna kan vara gynnsamma för byggandet av vindkraftverk. I exempelvis torra länder med många savanner eller öknar kan vindkraft komma att härska, samtidigt som vattenkraft levererar stora mängder energi i länder med lämpliga vattendrag. År 2011 svarade vattenkraft för hela 16% av världens totala energiproduktion, vilket visar att även energikällor som inte kan användas överallt ger stor produktion.<sup>[28]</sup>

Det finns idag ytterligare idéer om andra metoder för att använda solens energi för syntetiserande eller spjälkande reaktioner. Då människan så länge använt sig av solenergin för olika syften är det självklart att vi har en bred front att arbeta längs när det gäller att ta vara på den energi vi får av solen i enorma mängder.

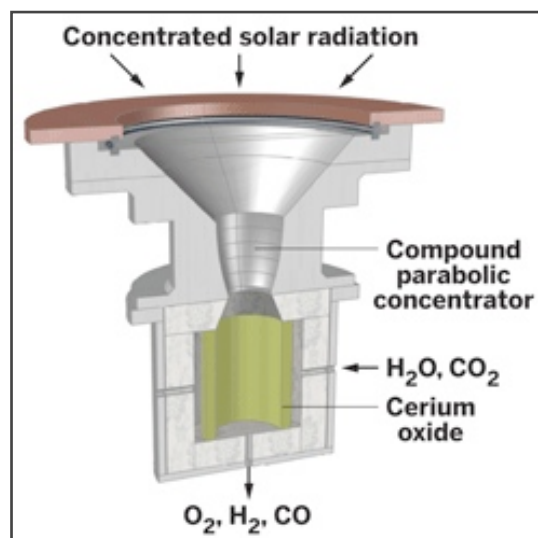
### ***Reduktion av koldioxid genom ceriumoxid***

En metod att exempelvis reducera det överflöd av koldioxid som finns i atmosfären är att använda sig av enorma paraboliska speglar. Dessa riktas in för att koncentrera sig på två kammare separerade av en ring av ceriumoxid (CeO<sub>2</sub>). Detta ämne har förmågan att binda en liten del av atmosfäriskt koldioxid, men denna reaktion kan komma att accelereras

---

<sup>xviii</sup> Se: 2.1.1: *Det skadliga förnybara*

kraftigt av den värme som alstras av speglarna som koncentrerar solljuset. Då temperaturer uppemot 1500 °C uppstår på grund av det energirika solljuset kommer ceriumoxiden att reducera en syreatom som då färdas till en av kamrarna. Denna syreatom pumpas bort, och den nu reducerade ceriumpartikeln slussas istället in i den andra kammaren. Där kommer den i kontakt med koldioxid, och denna reduceras i sin tur. Ceriumoxiden har nu så att säga återställts, och kolmonoxid har bildats.<sup>[21]</sup> En liknande process är illustrerad i fig. 2.1.

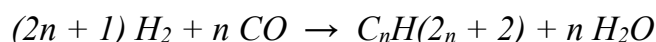


**Fig. 2.1.** En konstruktion som kan reducera ceriumoxid genom solljus. Solljuset riktas in genom konstruktionens övre del och träffar sedan ceriumoxiden. Produkter är syre, väte och kolmonoxid.

Källa: <https://pubs.acs.org/cen/news/89/i01/8901notw3.html>

### **Fischer-Tropsch metoden**

År 1920 genomförde kemisterna Franz Fischer och Hans Tropsch processer som efter dem har fått namnet Fischer-Tropsch metoden. Genom att bland annat låta vätgas reagera med kolmonoxid med hjälp av en koboltkatalysator lyckades man bilda kolväten, som kan användas som bränslen eller liknande. En formel för reaktionen kan ställas upp enligt följande.<sup>xix</sup>



Detta är den reaktion av Fischer-Tropsch metoden som bildar en mängd olika kolväten (alkaner) i form av olja, som sedan kan användas som exempelvis smörjmedel eller bränsle. Produkterna skapas av material som kol, naturgas eller biomassa. För att genomföra effektiva reaktioner behövs det dock relativt höga temperaturer och ibland högt tryck (för höga temperaturer stimulerar dock bildandet av oönskad metan), då dessa faktorer ökar reaktionshastigheten.<sup>[29]</sup>

Det finns mängder av ytterligare metoder, både äldre och moderna, vilka kan ses som konkurrenter till den syntetiska fotosyntes som bland annat det konstgjorda bladet bygger på. Forskningen går framåt i otroligt många områden, och för att framgångsrikt kunna skapa något måste man idag ofta finna en nisch där koncentrerad utveckling av ett specifikt område är mest gynnsam. Projekten bakom det konstgjorda bladet har alltså ett mycket fördelaktigt syfte, nämligen att skapa en billig och effektiv lösning på energiproblemen. Många av de andra metoderna som finns är dyra att genomföra på

<sup>xix</sup> *n* motsvarar ofta 10-20.

grund av exempelvis användningen av sällsynta ämnen. Metoden som medför reduceringen av ceriumoxid har till exempel redan i och med valet av sitt verksamma ämne blivit en dyr process. Cerium är inget vanligt förekommande ämne – och ytterligare utvinning av sällsynta metaller eller mineraler är inget som kommer att gynna våra ekosystem eller miljön, åtminstone inte på kort sikt. Fischer-Tropsch metoden är redan etablerad och den har använts kommersiellt sedan 1950-talet.<sup>[30]</sup> Metoden är dock inte den uppenbara lösningen på energiproblemen då de bildade ämnena förbränns som vanliga fossila bränslen. Lösningen för miljöproblemen kräver bränslen och energitillgångar som inte grundar sig på utsläppet av bland annat koldioxid.

### 2.2.3 Det konstgjorda bladet

Med dagens finanssituation är det av stor vikt att lösningar på energiproblemen inte avskräcker företag eller distributörer från att lansera eller distribuera tekniken globalt. För att hålla nere kostnaderna på de material som används för konstgjord fotosyntes måste dessa bestå av icke-sällsynta metaller och ämnen. Metoder som använder katalysatorer innehållande exempelvis titan eller iridium är omedelbart dyrare än metoder med motsvarande men billigare metaller. Iridium är till exempel ett av de mest sällsynta grundämnena i jordskorpan.<sup>[31]</sup> Idag pågår många projekt för att skapa effektiva katalysatorer av metaller som nickel, mangan eller kobolt. Exempelvis innehåller naturens eget PSII som medverkar i fotosyntesens elektrontransport metallen mangan som – med hjälp av ett flertal andra ämnen och proteiner – kan spjälka vatten. Ett problem med dessa mer organiska lösningar kvarstår dock; organiska system har en högre benägenhet att sönderfalla eller visa instabila egenskaper. På grund av detta har naturen skapat en mängd effektiva reparationsmekanismer för att omedelbart kunna reparera skador i proteiner eller liknande som medverkar i fotosyntesen. Alternativt byts hela delar av processen helt enkelt ut.<sup>[19]</sup> Något sådant är idag mycket svårt att efterlikna, och det kommer att krävas mer tid och forskning inom många områden för att nå den nivå på tekniken som gör något sådant möjligt. Om vi i framtiden kan implementera avancerade reparationsmekanismen kan vi också skapa stabilare fotosyntetiska processer.

Genom att samla alla delar av den konstgjorda fotosyntesen i samma “blad” kan kostnaderna sänkas ytterligare. Många processer kan samverka och dra nytta av varandra, och man kan effektivisera tekniken för en högre verkningsgrad. Detta ger också vinster i längden, då mindre material ger större mängder energi i form av exempelvis vätgas. Problem som uppkommer med det konstgjorda bladet är bland annat att alla beståndsdelar måste optimeras tillsammans för att fungera i närheten av varandra, och för att systemet ska kunna vara stabilt under längre tidsrymder. Skadas någon del av

materialet påverkar detta självklart effektiviteten kraftigt om inte reparations- eller utbytesprocesser finns att tillgå.<sup>xx</sup> Speciellt de organiska katalysatorerna är instabila och kan ta stor skada av reaktiva ämnen som väte och syre, vilka kommer att cirkulera i det konstgjorda bladet.

Andra faktorer som ligger i fokus under utvecklingen av det konstgjorda bladet är att det ska kunna användas under normala förhållanden. I laboratorium utförs konstgjord fotosyntes som nämnt ofta under onaturliga eller hårda förhållanden. Detta kommer dock inte att vara fallet då tekniken ska användas ute i världen, utan den ska fungera utan exempelvis extrema temperaturer, pH-värden eller liknande. Växterna utför skickligt sin fotosyntes i vanliga förhållanden, och för att det konstgjorda bladet ska vara konkurrenskraftigt mot andra metoder att alstra energi måste det troligtvis även fungera i så många olika förhållanden som möjligt. Materialet ska kunna utstå kraftig värme, och för att kunna användas i nordligare trakter kanske även temperaturer närmare fryspunkten. Då man idag oftast inte kan utföra tekniken effektivt under normala förhållanden är det av stor vikt att detta görs möjligt.

En billigare teknik bakom den konstgjorda fotosyntesen kommer att gynna hela världen, speciellt utvecklingsländer och platser där andra energikällor är svåra att etablera. Den enkla och eleganta lösningen möjliggör för effektiv utvinning av ett bränsle utan speciell miljöpåverkan. Den låga kostnaden gör det enkelt att distribuera och sprida den konstgjorda fotosyntesen globalt och till platser där byggandet av andra förnybara energikällor är opraktisk eller nästan omöjlig.

---

<sup>xx</sup> Muntlig intervju med Johannes Messinger, december 2013.

### 3. Sammanfattning

#### 3.1 Sammanfattning av frågeställningar

*- Fungerar konstgjord fotosyntes i teorin och i praktiken med den kunskap vi har idag? Om inte, vilka är begränsningarna och problemen?*

Konstgjord fotosyntes finns idag som bevisat koncept och fungerande teknik. Genom ett flertal metoder och användningsområden har bland annat vatten kunnat spjälkas med hjälp av energi från solens ljus. Tekniken har dock fortfarande begränsningar och ingen självklar position på världsmarknaden. Det kvarstår relativt mycket arbete och forskning för att kunna förbättra konstgjord fotosyntes till den nivå att tekniken kan användas för energiproduktion globalt. Många olika forskningsgrupper arbetar idag med att syntetisera naturens livgivande process, och har även fått erkännande för sina insatser. Bland annat JCAP (Joint Centre for Artificial Photosynthesis) har en målsättning att kunna lansera ett fungerande koncept på konstgjord fotosyntes till år 2015, och är på relativt god väg att lyckas med det.

Begränsningarna för tekniken är främst att vi idag inte har tillräcklig kunskap om reaktionerna och processerna under fotosyntesen för att kunna efterlikna denna helt. Under det senaste decenniet har stora framsteg gjorts inom området, och man har idag relativt detaljerade bilder av bland annat växters proteinkomplex, till exempel PSII. Genom att analysera strukturen och funktionen av dessa proteiner kan fotosyntesen analyseras bättre och den syntetiska processen effektiviseras. Daniel G. Nocera skriver att "nyckeln till att duplicera fotosyntesen ligger helt i förmågan att uppnå soldriven spjälkning av vatten genom en direkt metod". Det huvudsakliga bindandet av solens energi sker då vätgas bildas under fotosyntesen och detta är alltså den viktigaste reaktionen att efterlikna.

Ljusabsorption samt spjälkning av vatten är två av de största problemen som finns med konstgjord fotosyntes idag. Problematiken med ljusabsorptionen och att skapa ett väl fungerande LHC (Light Harvesting Complex) är bland annat att effektivisera absorptionen av ljus längs hela det synliga spektret. På så sätt kan fotosyntesen förbättras kraftigt och generera en högre effekt.<sup>xxi</sup>

Katalysatorer som spjälkar vattnet är en essentiell del av den konstgjorda fotosyntesen. För att sänka kostnader och miljöpåverkan av produktionen av materialet måste

---

<sup>xxi</sup> Idag ligger effekten av naturlig fotosyntes på cirka 1%. Muntlig intervju med Johannes Messinger, december 2013.

katalysatorerna byggas upp av rikligt förekommande ämnen. Sådana ämnen inkluderar kobolt, nickel eller mangan. Genom att sänka kostnaderna underlättar man även för produktion och distribution av materialet.

*- Varför tillämpas den inte för storskalig energiproduktion?*

Tekniken bakom konstgjord fotosyntes är idag inte stabil och effektiv nog för att kunna användas som tillförlitlig energikälla världen över. I många fall är den existerande syntetiska fotosyntesen beroende av sällsynta eller relativt ovanliga ämnen för att kunna produceras, eller för strukturellt och kemiskt instabil för att kontinuerligt kunna leverera energi eller bränsle. Detta gör att den konstgjorda fotosyntesen idag är olämplig att använda för något så känsligt som energiproduktion. Stora produktionskostnader avskräcker troligtvis många. Ett av de tänkta användningsområdena är även utvecklingsländer och liknande, som inte gynnas av dyr teknik kontrollerad av stora företag i västvärlden. Metoden att bilda bränslen som vätgas måste först bli enklare och mer tillgänglig världen över. Energimarknadens situation gör det också svårt för den konstgjorda fotosyntesen att etablera sig. Den lukrativa marknaden för fossila bränslen saknar idag likvärdig konkurrens, och för att förändra detta behöver tekniken bakom den konstgjorda fotosyntesen som sagt bland annat bli billigare och effektivare.

*- Hur fungerar det så kallade "konstgjorda bladet", och vilka är grundprinciperna och problemen? Vilka är de viktigaste återstående frågeställningarna kring detta ämne?*

Det konstgjorda bladet bygger på att alla processer i den syntetiska fotosyntesen ska kombineras i ett och samma material. I och med detta sänks kostnader, framställningen av materialet förenklas och användningsområdet blir självklart. Andra grundkriterier för det konstgjorda bladet är att det ska fungera under normala förhållanden, vara uppbyggt av frekvent förekommande naturliga ämnen, ha en högre verkningsgrad än bland annat naturlig fotosyntes, samt i vissa fall ha förmågan att reparera sig självt.

Bladets främsta beståndsdelar är en katalysator som spjälkar vatten till vätgas och syre, samt ett LHC som har en god förmåga att fånga energin i solljus. Att ta fram en lämplig katalysator är ett viktigt område för många forskarlag. Bland annat *The Messinger Research Team* (vid Umeå universitet) arbetar idag med att effektivisera katalysatorer

uppbyggda av bland annat mangan,<sup>xxii</sup> nickel eller kobolt.<sup>xxiii</sup> Forskningen gör goda framsteg men än har inte rätt katalysatorer tillverkats eller hittats. JCAP (vid bl.a Caltech) arbetar även med att ta fram ett effektivt LHC som ger den konstgjorda fotosyntesen bättre verkningsgrad genom att ämnet absorberar solljuset i ett vidare spektrum. Detta LHC kan sedan kombineras med en effektiv katalysator för vattenspjälkning och höja verkningsgraden på den konstgjorda fotosyntesen markant. En ytterligare frågeställning för forskningen kring det konstgjorda bladet är hur processen kan återskapas för att även vara verksam i mörkret, det vill säga då vanliga solceller helt slutar att generera energi. Sammantaget betyder detta att det konstgjorda bladet ska vara effektivare, stabilare och billigare än dagens konstgjorda fotosyntes.

Användningsområdet för det konstgjorda bladet är liknande det för solceller, dock är produkten det genererar en annan. Vätgas är lättare att lagra än den elektricitet som genereras av solceller, och därmed ökar värdet av det syntetiska bladet under dygnets mörka timmar. Det förhoppningsvis reducerade priset på tekniken gör även att denna kan användas i utvecklingsländer där tillgången till andra energikällor är begränsad.

---

<sup>xxii</sup> Mangan återfinns i växtens PSII, dvs. den naturliga fotosyntesen.

<sup>xxiii</sup> Muntlig intervju med Yongqi Liang vid Umeå universitet, mars 2014.



## 4. Slutdiskussion

### 4.1 Framtidens konstgjorda fotosyntes

I framtiden kan den konstgjorda fotosyntesen förhoppningsvis leda till att den globala uppvärmningen (och andra negativa biverkningar av utvinningen och användandet av fossila bränslen) avtar eller stoppas. Genom att produkten av förbränningen av vätgas endast är vattenånga mildras utsläppen av koldioxid kraftigt om ett vätgasbaserat samhälle tar sin början i och med effektiv syntetisk fotosyntes. Först måste dock vätgasen förtjäna sin plats som bränsle i världen. Även bränsleceller och andra tekniker som använder sig av vätgasen måste effektiviseras för att möta efterfrågan. Vätgasdrivna fordon finns redan, men för att konkurrera ut de väl utvecklade bensindrivna fordonen behövs fortsatta framsteg inom forskningsområdet. Lyckas detta kan de negativa effekterna av fossila bränslen förhoppningsvis begränsas kraftigt och därmed stoppa den klimatförändring som kan leda till oacceptabla konsekvenser för vår planet.

### 4.2 Metodval

Att läsa om forskningen bakom den konstgjorda fotosyntesen, och även vetenskapen som gett oss insikt i hur växternas processer fungerar, var en mycket god källa till information. Det görs för tillfället många framsteg och upptäckter inom dessa ämnen, vilket leder till stora mängder ny eller relativt ny information att läsa om. Det finns otaliga rapporter och avhandlingar som behandlar ämnet, samt årtionden av vetenskapliga framsteg att lära sig om. Tack vare engagerade forskare som till exempel Johannes Messinger och Yongqi Liang kunde jag behålla entusiasmen för att lära mig om hur forskningen om den konstgjorda fotosyntesen ser ut idag. Litteratur, rapporter och andra källor har hjälpt mycket i min strävan att förstå ämnet.

Litteraturstudier var ett lämpligt tillvägagångssätt för arbetet. Då det som sagt finns så generösa mängder litteratur att läsa om ämnet i fråga var det både lärorikt och överrumplande med mängden tillgänglig information. Något som hade kunnat hjälpa ytterligare vore mer erfarenhet av området i praktiken, såsom arbetet *The Messinger Research Group* ägnar sig åt. Vidare experiment som behandlar forskningen hade varit en nyttig tillgång under arbetets gång för att vidare kunna fördjupa sig. På grund av tidsbrist kunde inte experiment med *The Messinger Research Group* genomföras fullständigt som planerat, utan endast påbörjas.

## Referenser

- [1] Carlyle, Ryan (2013). *Should Other Nations Follow Germany's Lead On Promoting Solar Power?* <https://www.quora.com/Alternative-Energy/Should-other-nations-follow-Germanys-lead-on-promoting-solar-power-1> (Hämtad 27.3.2014).
- [2] Contreras, Miguel A. & Deb, Satyen (2011). *Solar energy overview*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [3] Silberg, Bob (2013). *Artificial photosynthesis to make plants green with envy*. <http://phys.org/news/2013-08-artificial-photosynthesis-green-envy.html> (Hämtad den 20.3.2014).
- [4] U.S. Energy Information Administration (2013). *What is U.S. electricity generation by energy source?* <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=427&t=3> (Hämtad den 26.3.2014).
- [5] Faunce, Thomas & Styring, Stenbjörn et.al. (2013). *Artificial photosynthesis as a frontier technology for energy sustainability*. *Energy Environ. Sci.*, 2013, 6, 1074.
- [6] Wikipedia (2014a). *Invasion of Kuwait*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Invasion\\_of\\_Kuwait#Economic\\_warfare\\_and\\_slant\\_drilling](http://en.wikipedia.org/wiki/Invasion_of_Kuwait#Economic_warfare_and_slant_drilling) (Hämtad den 26.3.2014).
- [7] Messinger, Johannes & Shevela, Dmitriy (2011). *Principles of photosynthesis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [8] Verne, Jules (1874). *Den hemlighetsfulla ön*. <http://www.online-literature.com/verne/mysteriousisland/33/> (Hämtad den 26.3.2014).
- [9] Zyga, Lisa (2006). *Why a hydrogen economy doesn't make sense*. <http://phys.org/news85074285.html> (Hämtad den 20.3.2014).
- [10] Leber, Rebecca (2013). *Exxon, Chevron Made \$71 Billion Profit In 2012 As Consumers Paid Record Gas Prices*. <http://thinkprogress.org/climate/2013/02/01/1525441/exxon-chevron-2012-profit/> (Hämtad den 20.3.2014).
- [11] Huffington Post (2013). *Exxon Mobil's 2012 Profits Just Shy Of Breaking Global Record*. [http://www.huffingtonpost.com/2013/02/01/exxon-mobil-profit-world-record\\_n\\_2598502.html](http://www.huffingtonpost.com/2013/02/01/exxon-mobil-profit-world-record_n_2598502.html) (Hämtad den 20.3.2014).
- [12] Chemical Biology Centre (2011). *70 million krona from Wallenbergfoundations for KBC research on artificial photosynthesis and colon cancer*. <http://www.kbc.umu.se/news/404-70-million-krona-from-wallenbergfoundations-for-kbc-research-on-artificial-photosynthesis-and-colon-cancer.html> (Hämtad den 20.3.2014).
- [13] Fällman, Hans (2011). *Två projekt vid Umeå universitet får 70 Wallenbergmiljoner*. <http://www.medfak.umu.se/nyhet//.cid169310> (Hämtad den 24.3.2014).

- [14] Butt, Natalie & Beyer, Hawthorne (2013). *Leave it in the ground! How fossil fuel extraction affects biodiversity*. <http://theconversation.com/leave-it-in-the-ground-how-fossil-fuel-extraction-affects-biodiversity-19484> (Hämtad den 27.3.2014).
- [15] Union of Concerned Scientists (2013). *Environmental Impacts of Wind Power*. [http://www.ucsusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/renewable-energy/environmental-impacts-wind-power.html](http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/environmental-impacts-wind-power.html) (Hämtad den 27.3.2014).
- [16] Pierpont, Nina (2010). *Wind Turbine Syndrome*. <http://www.counterpunch.org/2010/10/29/wind-turbine-syndrome/> (Hämtad den 27.3.2014).
- [17] Barnard, Mike (2013). Svar till: *Is Dr. Nina Pierpoint's "Wind Turbine Syndrome" a real medical syndrome caused by wind turbines?* <http://www.quora.com/Wind-Energy/Is-Dr-Nina-Pierpoints-Wind-Turbine-Syndrome-a-real-medical-syndrome-caused-by-wind-turbines/answer/Mike-Barnard> (Hämtad den 27.3.2014).
- [18] Joint Centre for Artificial Photosynthesis (2014). *Overview*. <http://solarfuelshub.org/about/> (Hämtad den 27.3.2014).
- [19] Nocera, Daniel G. (2012). *The Artificial Leaf*, Accounts of Chemical Research, Vol. 45, No. 5: 767-776.
- [20] Silberg, Bob (2013). *Artificial photosynthesis to make plants green with envy*. <http://phys.org/news/2013-08-artificial-photosynthesis-green-envy.html> (Hämtad den 20.3.2014).
- [21] The Green Age (2013). *Artificial Photosynthesis*. <http://www.thegreenage.co.uk/tech/artificial-photosynthesis/> (Hämtad den 27.3.2014).
- [22] Osterloh, Frank E. & Parkinson, Bruce A. (2011). *Recent developments in solar water-splitting photocatalysis*, 17-18. [http://chemgroups.ucdavis.edu/~osterloh/pubs/ref\\_47.pdf](http://chemgroups.ucdavis.edu/~osterloh/pubs/ref_47.pdf) (Hämtad den 27.3.2014).
- [23] Clemmer, Steve (2013). *New Wind Power Cheaper than Existing Coal and Natural Gas in Many Parts of the Country*. <http://blog.ucsusa.org/new-wind-power-cheaper-than-existing-coal-and-natural-gas-in-many-parts-of-the-country-337> (Hämtad den 20.3.2014).
- [24] U.S. Department of Energy (2001). *The History of Solar*. [http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf) (Hämtad den 20.3.2014).
- [25] Energy.gov. *History of Wind Energy*. <http://energy.gov/eere/wind/history-wind-energy> (Hämtad den 27.3.2014).
- [26] Illustrated History of Wind Power Development (2002). *First Use of Wind for "Large-Scale" Generation of Electricity*. <http://telosnet.com/wind/20th.html> (Hämtad den 27.3.2014).
- [27] Green Peninsula (2011). *Public support for wind energy reinforced again*. <http://www.green-peninsula.com/2012/04/public-support-for-wind-energy-reinforced-again/> (Hämtad den 27.3.2014).

[28] Vattenfall (2013). *Fakta om vattenkraft*. <http://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varmeproduktion/vattenkraft/> (Hämtad den 27.3.2014).

[29] Wikipedia (2014b). *Fischer–Tropsch process*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Fischer-Tropsch\\_process](http://en.wikipedia.org/wiki/Fischer-Tropsch_process) (Hämtad den 27.3.2014).

[30] (1954) *Popular Mechanics*. Januari: 264. [http://books.google.se/books?id=8dwDAAAAMBAJ&pg=PA264&dq=1954+Popular+Mechanics+January&hl=en&sa=X&ei=IYK0T7T1Es2dgQe5iMgH&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=true](http://books.google.se/books?id=8dwDAAAAMBAJ&pg=PA264&dq=1954+Popular+Mechanics+January&hl=en&sa=X&ei=IYK0T7T1Es2dgQe5iMgH&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true) (Hämtad den 27.3.2014).

[31] Wikipedia (2014c). *Iridium*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Iridium> (Hämtad den 27.3.2014).

## Övriga referenser

### Tryckta källor

Björndahl, Gunnar & Castenfors, Johan (2012). *Spira Biologi 2*. 2. uppl. Stockholm: Liber.

Ginley, David S. (red) & Cahen, David (red) (2011). *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*. Cambridge: Cambridge University Press.

### Internetkällor

Campbell, Richard J. (2013). *Increasing the Efficiency of Existing Coal-Fired Power Plants*. <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/R43343.pdf> (Hämtad den 20.3.2014).

Clark, Jim (2013). *Types of Catalysis*. <http://www.chemguide.co.uk/physical/catalysis/introduction.html> (Hämtad den 20.3.2014).

Clean Technica (2013). *Solar Power & Wind Power Now Cheaper Than Coal Power In US*. <http://cleantechnica.com/2013/09/19/nrdc-clean-energy-affordable-way-power-us/> (Hämtad den 20.3.2014).

Encyclopædia Britannica (2013). *Exxon Corporation*. <http://global.britannica.com/EBchecked/topic/199234/Exxon-Corporation> (Hämtad den 20.3.2014).

Energy Supply Administration of Australia (2012). *What is coal seam gas?* [https://www.esaa.com.au/energy\\_you/what\\_is\\_coal\\_seam\\_gas](https://www.esaa.com.au/energy_you/what_is_coal_seam_gas) (Hämtad den 20.3.2014).

Euractiv (2007). *Analysis: Efficiency of coal-fired power stations – evolution and prospects*. <http://www.euractiv.com/energy/analysis-efficiency-coal-fired-power-stations-evolution-prospects/article-154672> (Hämtad den 20.3.2014).

Fannin, Penny (2009). *Photosynthesis comes into the light*. <http://www.swinburne.edu.au/magazine/5/112/photosynthesis-comes-into-the-light/> (Hämtad den 20.3.2014).

Fauce, Thomas (2013). *Powering the World with Artificial Photosynthesis*. <http://www.wfs.org/futurist/2013-issues-futurist/may-june-2013-vol-47-no-3/powering-world-artificial-photosynthesis> (Hämtad den 20.3.2014).

Green America (2014). *Coal: Why It's Dirty*. <http://www.greenamerica.org/programs/climate/dirtyenergy/coal/whydirty.cfm> (Hämtad den 20.3.2014).

Jaret, Peter (2013). *The Promise of Artificial Photosynthesis*. Bioenergy Connection. Vol 2.2: 19-21. [http://www.energybiosciencesinstitute.org/sites/default/files/upload/2013winter\\_Photosynthesis.pdf](http://www.energybiosciencesinstitute.org/sites/default/files/upload/2013winter_Photosynthesis.pdf) (Hämtad den 20.3.2014).

Klimatsmart (2011). *Projekt om förnybar energi får stöd*. <http://www.klimatsmart.se/nyheter/projekt-om-fornybar-energi-far-stod.html> (Hämtad den 20.3.2014).

Laskowski, Kyle (2010). *Coal power: Pollution, politics, and profits*. <http://www.visionofearth.org/featured-articles/coal-power-pollution-politics-and-profits/> (Hämtad den 20.3.2014).

Larson, Aaron (2013). *Europe's Most Efficient Coal Plant Comes Online*. <http://www.powermag.com/europes-most-efficient-coal-plant-comes-online/> (Hämtad den 20.3.2014).

Messinger, Johannes (2012). *An Institutional Approach to Solar Fuels Research*. <http://umu.diva-portal.org/smash/get/diva2:527418/FULLTEXT03.pdf> (Hämtad den 20.3.2014).

NRDC (2014). *Global Warming*. <http://www.nrdc.org/globalwarming/> (Hämtad den 20.3.2014).

Ström, Anna (2011). *Scientists Win Grant to Make 'Artificial Leave'*. <http://www.bio4energy.se/component/content/article/84-latest-news/165-umu-scientists-win-44-to-develop-artificial-leave.html> (Hämtad den 20.3.2014).

The Swedish Energy Agency (2003). *Artificial photosynthesis: Deriving energy from sunlight and water*. <http://www.fotomol.uu.se/Forskning/Biomimetics/fotosyntes/ArtF1okt.pdf> (Hämtad den 20.3.2014).

The Swedish Energy Agency (2007). *Artificial photosynthesis: Energy from sunlight and water 2008*. [http://www.fotomol.uu.se/Forskning/Biomimetics/fotosyntes/documents/ArtFoto\\_Eng.pdf](http://www.fotomol.uu.se/Forskning/Biomimetics/fotosyntes/documents/ArtFoto_Eng.pdf) (Hämtad den 20.3.2014).

Umeå universitet (2011). *The Messinger Research Group*. <http://project.chem.umu.se/jme/> (Hämtad den 20.3.2014).

Urbina, Ian (2011). *Hunt for Gas Hits Fragile Soil, and South Africans Fear Risks*. [http://www.nytimes.com/2011/12/31/world/south-african-farmers-see-threat-from-fracking.html?\\_r=4&ref=world&src=me&pagewanted=all&](http://www.nytimes.com/2011/12/31/world/south-african-farmers-see-threat-from-fracking.html?_r=4&ref=world&src=me&pagewanted=all&) (Hämtad den 20.3.2014).

U.S. Energy Information Administration (2014). *What is the efficiency of different types of power plants?* <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=107&t=3> (Hämtad den 20.3.2014).

Wendell, Joakim (2011). *Förhistorisk tid*. <http://www.historia2.se/historia123/?p=282> (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014d). *Artificial photosynthesis*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Artificial\\_photosynthesis](http://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_photosynthesis) (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014e). *Photosystem II*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Photosystem\\_II](http://en.wikipedia.org/wiki/Photosystem_II) (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014f). *P680*. <http://en.wikipedia.org/wiki/P680> (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014g). *Cost of electricity by source*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Relative\\_cost\\_of\\_electricity\\_generated\\_by\\_different\\_sources](http://en.wikipedia.org/wiki/Relative_cost_of_electricity_generated_by_different_sources) (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014h). *Hydraulisk spräckning*. [http://sv.wikipedia.org/wiki/Hydraulisk\\_spr%C3%A4ckning](http://sv.wikipedia.org/wiki/Hydraulisk_spr%C3%A4ckning) (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014i). *Shale oil extraction*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Shale\\_oil\\_extraction](http://en.wikipedia.org/wiki/Shale_oil_extraction) (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014j). *Photocatalysis*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Photocatalysis> (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014k). *Hydrogenase*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogenase> (Hämtad den 20.3.2014).

Wikipedia (2014l). *Cerium(IV) oxide*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Cerium\(IV\)\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Cerium(IV)_oxide) (Hämtad den 27.3.2014).

## Bildkällor

[Fig. 1.1] sida 12, kapitel 1.4.1 Fotosyntes.

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plagiomnium\\_affine\\_laminazellen.jpeg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plagiomnium_affine_laminazellen.jpeg) (Hämtad den 23.11.2013).

[Fig. 1.2] sida 12, kapitel 1.4.1 Fotosyntes.

[http://bioenergy.asu.edu/photosyn/courses/BIO\\_343/lab/Experiment-II.html](http://bioenergy.asu.edu/photosyn/courses/BIO_343/lab/Experiment-II.html) (Hämtad den 9.2.2014).

[Fig. 1.3] sida 14, kapitel 1.4.1 Fotosyntes.

<http://www.jonniel.com/en/psIIimages/KokCycle.html> (Hämtad den 9.2.2014).

[Fig. 1.4] sida 15, kapitel 1.4.2 Konstgjord fotosyntes.

Matthis Schneider (2014).

[Fig. 1.5] sida 21, kapitel 1.4.2 Konstgjord fotosyntes.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Photosystem\\_II](http://en.wikipedia.org/wiki/Photosystem_II) (Hämtad den 25.3.2014).

[Fig. 2.1] sida 33, kapitel 2.2.2 Varför lanseras inte konstgjord fotosyntes?

<https://pubs.acs.org/cen/news/89/i01/8901notw3.html> (Hämtad den 24.3.2014).



