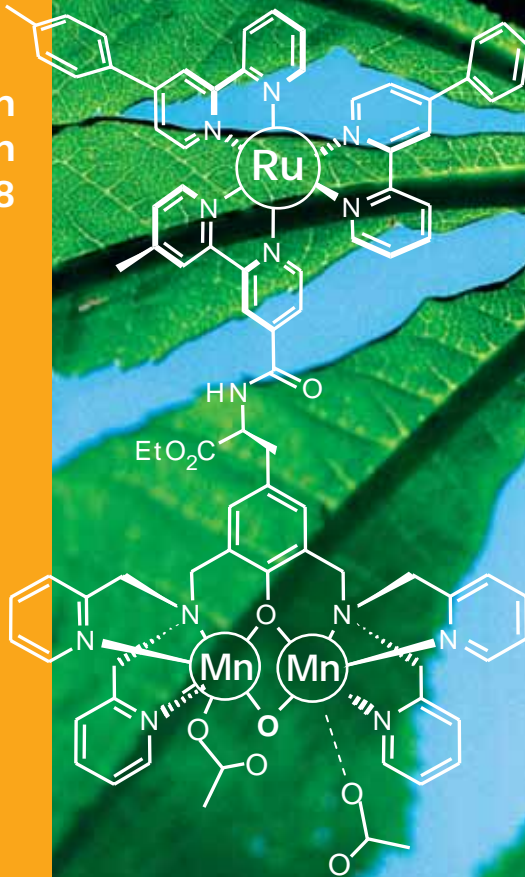


Artificiell fotosyntes

Energi från
sol och vatten
2008



STATENS ENERGIMYNDIGHET. ET 2007:53. 2000 EX, DECEMBER 2007

FORMGIVNING OCH REPRO: EDITA COMMUNICATION

TRYCK: EDITA VÄSTRA AROS

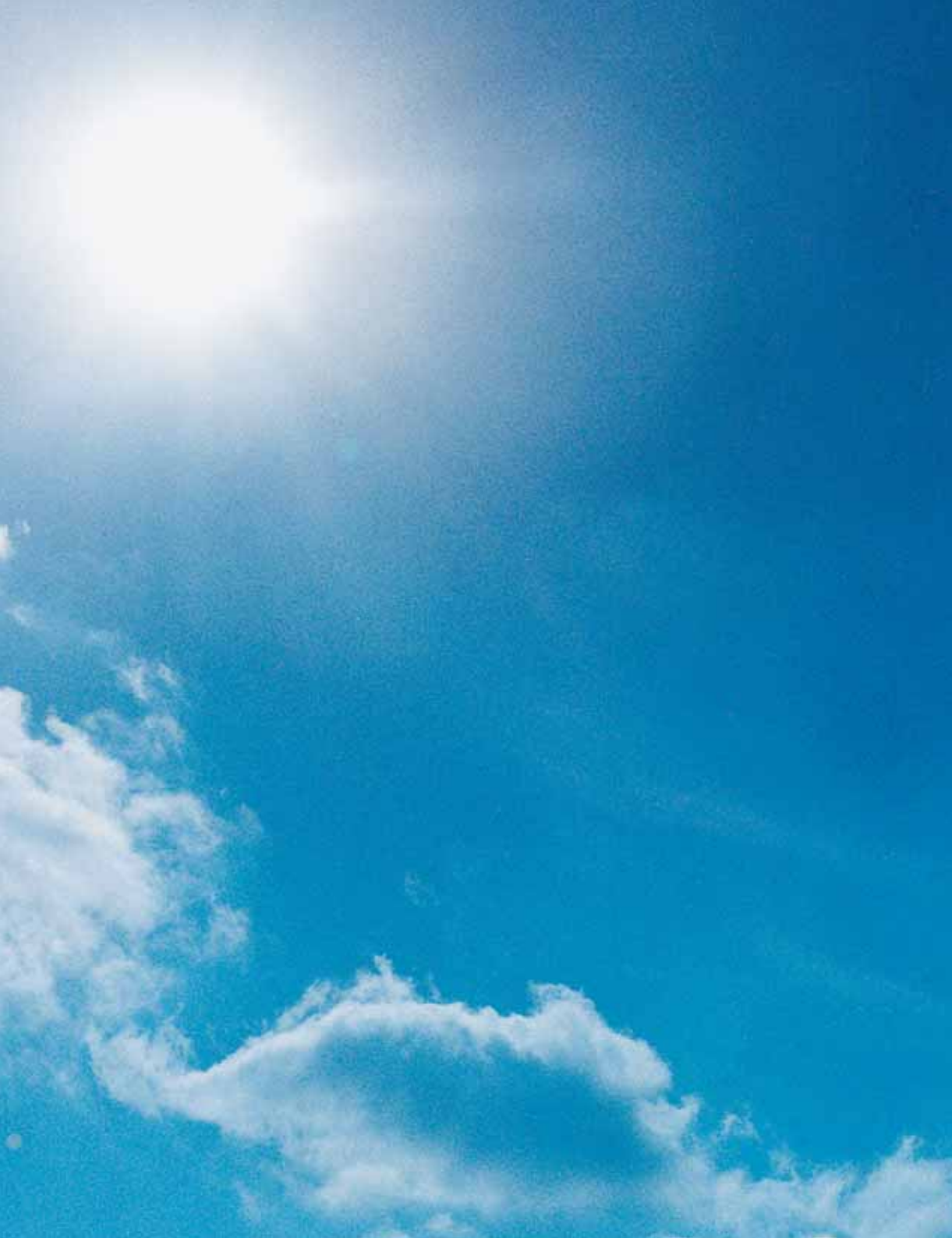
TEXT: ENERGIMYNDIGHETEN OCH DOCENT ANN MAGNUSON

ILLUSTRATIONER: KONSORTIET FÖR ARTIFICIELL FOTOSYNTES

FOTO: PER WESTERGÅRD, EYEONET, SCANPIX



En forskare studerar artificiell
fotosyntes med hjälp av laserljus



Inledning

Klimatfrågorna ökar kraven på att skapa ett uthålligt energisystem, som bygger på förnybara energikällor med minimal miljöpåverkan. En god försörjningstrygghet är ett annat krav.

Varje år strålar enorma mängder solljusenergi in även hos oss i norr. Sammanlagt är energimängden i solinstrålningen över Sverige ca 400 000 TWh per år. Som jämförelse ligger Sveriges årliga energianvändning på ca 400 TWh. Frågan är hur solenergin på ett enkelt och kostnadseffektivt sätt kan omvandlas till användbar energi i form av el, värme och drivmedel.

Dessvärre är solinstrålningen som minst på vintern när det är mörkt och kallt och energibehovet är som störst. Därför behöver solenergin kunna lagras i form av någon lämplig energibärare

Vätgas är en av flera sådana möjliga energibärare. En av vätgasens fördelar är att den vid användning inte släpper ut någon koldioxid. Men de nuvarande metoderna för att producera vätgas är baserade på fossila bränslen. Om man därför kan utveckla en energieffektiv och utsläppsfri produktion av vätgas, blir den också en av flera intressanta energibärare för ett uthålligt energisystem.

Därför satsar forskningen nu på att utveckla en möjlig framtida teknik för vätgasproduktion, att härma växternas fotosyntes genom artificiell fotosyntes.



Olika mikroorganismer som alla kan producera vätgas från sol och vatten: *Synechocystis* (överst) är en encellig cyanobakterie; *Nostoc* (nederst) är en trådformig cyanobakterie, som dessutom kan omvandla luftens kväve till viktiga näringsämnen. Cyanobakterierna odlas i en specialjord så kallad bioreaktor (mitten), där ljusmängd, temperatur och tillgång på näringsämnen är noggrant reglerade. I framtiden kan stora bioreaktorer fulla med cyanobakterier vara en källa till biologiskt framställd vätgas från sol och vatten.

Vätgas, framtidens energibärare?

Vätgas är ett bränsle med högt energiinnehåll. Men för att vätgas som energibärare skall bli en del av ett uthålligt energisystem måste tekniken utvecklas vidare. Vätgas är skrymmande i förhållande till sin vikt, vilket försvårar användningen vid lagring och långväga transporter. Bränsle-cellstekniken har utvecklats mycket de senaste åren men kan behöva optimeras för vätgasanvändning. Alla dessa aspekter kräver en teknikutveckling innan vi kan börja använda vätgas i samhället. Enligt Internationella Energitbyråns (IEA) bedömningar, kan vätgas som energibärare komma att göra entré på marknaden runt år 2020. Hur fort det går, beror till stor del på om det kommer fram ett kostnadseffektivt och miljövänligt sätt att framställa vätgas på. För att hålla kostnader för infrastruktur och transporter nere, är det önskvärt med små, decentraliserade produktionsanläggningar för vätgasproduktion. Det krävs alltså ett långsiktigt perspektiv när man satsar på teknikutveckling för vätgasanvändning.

Om forskningen kring artificiell fotosyntes lyckas kan den ge oss betydande bidrag till uthållig vätgasproduktion. Men det finns också andra sätt att producera vätgas från solenergi.

Från solenergi till vätgas – olika tekniker

Solceller

Det finns effektiva solceller för elproduktion. Såväl kiselbaserade solceller, tunnfilmssolceller, som så kallade våta solceller (Grätzel-celler) är under snabb utveckling. Forskning och utveckling kring solceller för elproduktion är omfattande, och solen är på frammarsch på den europeiska energimarknaden.

Det finns system där det ljusinfångande materialet och elektroden är ett och samma, i så kallade fotoelektrokemiska solceller. Vätgasproduktionen sker då direkt i solcellen, och teoretiskt sett kan man uppnå höga verkningsgrader i ett sådant system. Ännu så länge befinner sig även denna teknik på ett grundläggande forskningsstadium.

Fotobiologisk vätgasproduktion

Cyanobakterier (även kallade blågröna alger) och gröna mikroalger kan omvandla solens energi till vätgas. Vätgasproduktionen katalyseras i mikroorganismerna av så kallade hydrogenaser – proteiner som både kan utveckla och konsumera vätgas.

I dagsläget är verkningsgraden för den fotobiologiska vätgasproduktionen låg, men med hjälp av genmodifiering av mikroorganismernas arvsanlag (DNA) är det möjligt att förbättra deras förmåga att producera vätgas.





Vätgas är en mångsidig energibärare. Den kan användas såväl som drivmedel som för värme- och elproduktion. Via EU-projekten CUTE och ECTOS har vätgasbussar med bränsleceller testats i två år med gott resultat i tio olika städer i Europa, bl.a. i Stockholms citytrafik.

Forskningen om hur man kan öka effektiviteten hos den fotobiologiska vätgasproduktionen är mycket aktiv runt om i världen och bedrivs intensivt även i Sverige.

Artificiell fotosyntes

Artificiell fotosyntes är, som namnet antyder, ett sätt att på konstgjord väg efterlikna växternas fotosyntes. Med artificiell fotosyntes skall sol-ljusenergin utnyttjas direkt i ett fotokemiskt system, för att skapa ett bränsle (vätgas). Vätgasen ska produceras genom att spjälka vatten med hjälp av solljus, via fotokemi.

En effektiv energiomvandling

När man uppskattar effektiviteten hos den naturliga fotosyntesen i växter, räknar man för det mesta bara med det som går att skörda i form av biomassa, bränsle eller mat. Då finner man att bara någon procent av den infångade ljusenergin har omvandlats till biomassa. Ofta hörs därför argumentet att den naturliga fotosyntesen är ineffektiv, och att varje försök till att härma fotosyntesen också måste leda till ett ineffektivt system. Detta är en missuppfattning.

I naturens fotosyntes är två processer kopplade i omvandlingen av solenergi. Den mest fundamentala processen är de så kallade ljusreaktionerna. Ljusreaktionerna innebär att solenergin fångas in och omvandlas till en kemiskt bunden form av energi. Steg två är de sekundära processerna ("mörkerreaktionerna"). I de sekundära processerna används den bundna energin till att ge livskraft åt växten, att bygga upp växtens delar,

och till reproduktion. Dessa sekundära processer har inte utvecklats för att vara energieffektiva, tvärtom är det i dessa steg som energin förbrukas i växterna, och ”går förlorad” för oss människor.

Ljusreaktionerna är däremot mycket effektiva. Upp till 30-40 procent av den infångade solenergin bevaras i bunden form, i naturliga kemiska energibärare. Med artificiell fotosyntes vill man härma de effektiva ljusreaktionerna, och utnyttja de kemiska och fysiska principer som styr dem. Den artificiella fotosyntesen har därför en potential att bli mycket effektiv.

Hur mycket energi kan artificiell fotosyntes producera?

Den teoretiskt maximala verkningsgraden, alltså andelen av den energimängd som absorberats, som kan bevaras, uppskattas till 40-50 procent, baserat på jämförelser med den naturliga fotosyntesen. I praktiken räknar man med att en verkningsgrad på 15 procent är realistisk. Hur mycket användbar energi blir detta?

Låt oss ta ett räkneexempel: Energimängden i solljuset som per år och kvadratmeter strålar in över Sverige, är ca 1000 kWh (kilowattimmar), oavsett om det är i Skåne, Mälardalen eller Norrbotten. Energianvändningen i vanlig enplansvillan är i runda tal 150 kWh per år och kvadratmeter. Om taket på enplansvillan täcks med en solapparat, som producerar bränsle från sol och vatten med 15 procent verkningsgrad, räcker alltså bränslet för att täcka villans energibehov.

För att täcka energibehovet hos våra transportsystem krävs det en yta motsvarande 70 kvadratmeter per person. Mindre än 0,2 procent av Sveriges totala yta skulle alltså kunna täcka hela energibehovet för transporter. Beräkningarna i exemplen är ungefärliga, men de visar att utveckling av solenergi inte behöver innebära att enorma landytor måste täckas av solfångare.

Forskare samarbetar

Forskning om artificiell fotosyntes bedrivs i relativt liten skala runt om i världen, bland annat i USA, Japan, Frankrike, Tyskland och Australien. I samtliga fall handlar det om grundforskning, ingen har ännu utvecklat en fungerande prototyp för ett system som producerar bränsle genom att



Studier i kemi eller molekylärbiologi lägger grunden för forskning om artificiell fotosyntes.

Kan man plugga artificiell fotosyntes på universitetet?

Hösten 2008 startar ett nytt utbildningsprogram på mastersnivå vid Uppsala Universitet. Programmets inriktning är Kemi och förnybar energi, och kan sökas av den som har en kandidatexamen eller motsvarande utbildning inom kemi. Kurserna kommer bland annat att handla om fotokemi och fotobiologi, artificiell fotosyntes, solceller, batterier, och bränsleceller. Mer information finns på: www.chemistry.uu.se/master

härma fotosyntesen. I de utländska forskargrupperna fokuseras arbetet på att härma olika delar av den naturliga fotosyntesen, och i många fall är målsättningen inte alls kopplad till energiframställning. Många forskare är mest intresserade av att skapa enskilda molekyler som ser ut och beter sig ungefär som molekyler i växter. I den typen av forskningsarbete koncentrerar man sig på fotosyntesens molekylära smådelar.

I Sverige är visionen att utveckla ett fullständigt kemiskt system för att producera bränsle från sol och vatten. Inspirationen och idéerna om hur detta kan åstadkommas hämtas direkt från frontlinjerna av forskningen kring den naturliga fotosyntesen. Men det kräver att forskare med olika kunskaper samarbetar. Ingen enskild forskare kan klara detta själv.

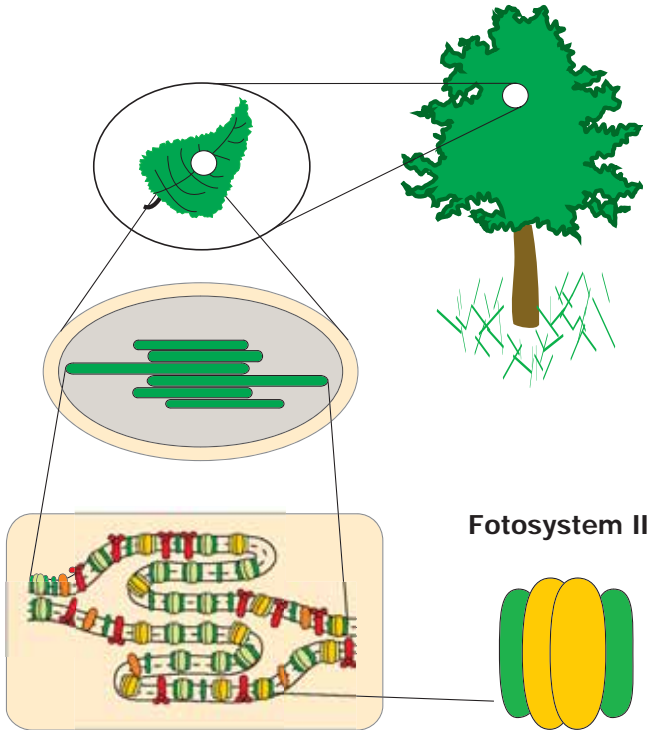
Konsortiet för Artificiell fotosyntes

Konsortiet för artificiell fotosyntes bildades 1994. Från början bestod det av fyra forskargrupper vid tre svenska universitet: Lunds, Stockholms och Uppsala Universitet. När forskningen växte i omfattning, bestämde sig forskarna så småningom för att det var dags att "flytta ihop". 2006 flyttade större delen av konsortiet över till Uppsala Universitet, och intog sina nybyggda lokaler på Ångströmlaboratoriet. Där arbetar nu forskare som är verksamma över kemins hela spektrum, från kemisk fysik, över synteskemi, till biokemi och molekylärbiologi. En forskargrupp är kvar vid Lunds Universitet, och man har täta kontakter med kollegorna i Uppsala.

Konsortiet för artificiell fotosyntes består av ca 45 personer. Alla har olika specialistkunskaper, för att bidra med så varierad kompetens som möjligt. Konsortiets forskare vill framställa en kemisk katalysator för sönderdelning av vatten, något som forskarsamhället alltid betraktat som mycket svårt att åstadkomma. Dessutom vill man utveckla möjligheterna att använda cyanobakterier, som har förmågan att göra vätgas av sol och vatten på biologisk väg. De olika frågeställningarna kräver att kemister, fysiker och biologer samarbetar.

Konsortiet har insett nödvändigheten av att samarbeta över de vetenskapliga ämnesgränserna. Tack vare sin erfarenhet av tvärvetenskapliga samarbeten, är man optimistisk inför möjligheten att lyckas. Konsortiets oortodoxa sammansättning av experter från olika områden har visat sig mycket produktiv, och har lett till att Sverige är världsledande inom forskning kring artificiell fotosyntes för energiändamål.

Det är i bladen det händer



Ljuset absorberas av det gröna färgämnet klorofyll. Klorofyll finns i membranbundna proteiner inuti bladens kloroplaster. De klorofyllbemängda proteinerna är som små soldrivna generatorer. Fotosystem II är en av dem. Det producerar energirika ämnen, med solljus och vatten som råvaror.

Naturens lösning på energifrågan

Avsikten är att göra vätgas från solenergi med rent vatten som råvara, genom vad som kallas biomimetisk, supramolekylär kemi. Med hjälp av kvalificerad kunskap om de naturliga kemiska processerna, kan ett system för artificiell fotosyntes utvecklas. Ett viktigt led i forskningsarbetet är därför att studera nyckelreaktioner i den naturliga fotosyntesen.

I fotosyntesen fångar växterna först in solenergi. Energin används för att spjälka (sönderdela) vatten, och därigenom binda energin. Till sist används den bundna energin för att växten ska växa och föröka sig. När vatten spjälkas bildas det syre vi andas, som en sorts avgas. Vid vattens-

spjälkningen frigörs elektroner och vätejoner, som båda är viktiga för att bilda energibärande molekyler. I ett artificiellt system, skall elektronerna och vätejonerna användas till att göra vätgas. Kruxet är att åstadkomma vattenspjälkningen. Det är svårt!

Solenergin binds av ett enzym

I alla växter och alger finns enzymer, som är bundna i olika biologiska membran, och som kan liknas vid små soldrivna generatorer. Inuti dessa flyttas elektroner, med solljusets hjälp, från ena sidan av membranet till den andra. På så vis skapas en spänning, ett energirikt tillstånd, över membranet som enzymer sitter i.

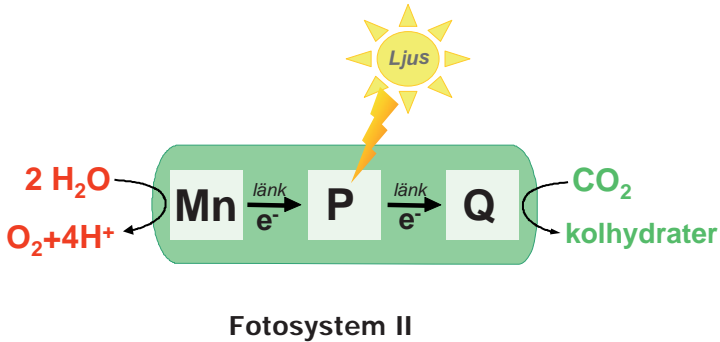
Det speciella enzym som forskarna är intresserade av att kunna härma, kallas Fotosystem II. Fotosystem II skapar och upprätthåller nämligen spänningen i membranet, genom att enzymet fångar in ljus och använder energin till att spjälka vattenmolekyler. När en elektronbrist uppstår på ena sidan membranet, måste bristen uppvägas av att en elektron skjuts till någonstans ifrån. Annars söker sig elektronen på den andra sidan tillbaka för att uppväga bristen, och energin som fångades upp i membranspänningen går förlorad. Fotosystem II har förmågan att fylla elektronbristen genom att ta elektroner från vatten och på så sätt bevara energin så att den kan användas.

Energiomvandling i fotosyntesen – steg för steg

Det går till såhär: Inuti Fotosystem II finns klorofyllmolekyler som absorberar solljus. När klorofyllet (P) har laddats med extra energi av ljuset, skickar det ut en elektron till elektronbärande ämnen i membranet (kinoner, Q). Elektronhållet som då uppstår måste fyllas på, och en elektron flyttas därför till klorofyllet från en grupp joner av metallen mangan, som bildar ett komplex. Mangankomplexet (Mn) drar i sin tur ut elektroner från vattenmolekyler (H_2O), som binds vid manganets yta. Vattenmolekylerna spjälkas på så vis sönder, och det bildas syrgas.

Vattenspjälkningen sker på ena sidan av membranet, och elektronerna transporteras till den andra sidan. Den absorberade solenergin bevaras genom att elektronerna används för att bygga upp kolhydrater av luftens koldioxid (CO_2). Elektronerna är ”klistret” som får kolhydraterna att hålla ihop.

Principen för fotosyntesens energiomvandling



Ljuset absorberas av klorofyllmolekyler (P). Elektroner (e⁻) strömmar då från ett mangankomplex (Mn) till ämnen som accepterar elektronerna (Q). Elektronerna slutar sin resa med byggandet av kolhydrater, med luftens koldioxid (CO₂) som byggmaterial. Elektronerna tas från början ur vatten (H₂O), med mangan (Mn) som katalysator. När vatten spjälkas, bildas syre (O₂) och vätejoner (H⁺).

Fotosystem II är modellen

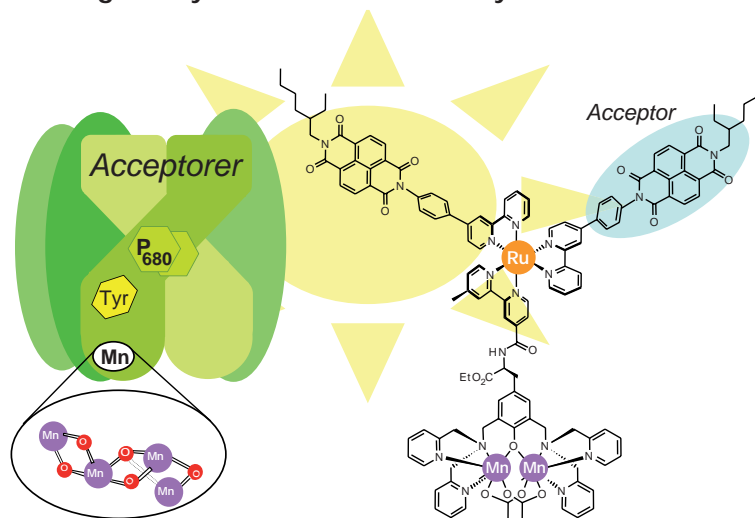
Vattenspjälkning och elektrontransport – det verkar komplicerat. Varför krångla till det? Om man vill omvandla solenergi till en bunden form – ett bränsle – så krävs någon form av elektronkälla, oavsett vilket bränsle det är. Vatten finns det gott om på vår jord, kan man ta elektroner därifrån har man en outtömlig energikälla. Faktum är att Fotosystem II är den enda kemiska katalysatorn som man känner till, som är kapabel att ta elektroner från vatten.

Fotosystem II är nyckeln till nästan allt jordiskt liv vi känner idag. Det är i själva verket en av naturens mest framgångsrika uppfinningar någonsin. Hemligheten är att den använder en outtömlig elektronkälla, vatten, och en outtömlig energikälla, solen. Tack vare Fotosystem II är växterna och algerna de dominerande livsformerna på jorden. Där det finns vatten och ljus, där finns det liv.

Om en "solapparat" byggd på artificiell fotosyntes skall kunna ge energi som kan lagras, måste det finnas en slutlig elektronkälla, precis som för växterna. Konsortiet vill använda vatten för detta ändamål. Fotosystem II är därför förebilden för forskare i artificiell fotosyntes, och vill man kunna efterhära den naturliga fotosyntesens effektiva energiomvandling, måste man förstå hur den fungerar i minsta detalj.

Ett artificiellt "fotosystem" efterliknar det naturliga Fotosystem II på flera sätt: Båda har en ljusabsorberande del, "P" i Fotosystem II, rutenium (Ru) i det artificiella systemet. När ljuset absorberas flyttas en elektron till acceptorämnen, som i naturen är kinoner. Liknande acceptorer (ljusblå markering) används i det artificiella systemet. Elektroner fylls på från mangankomplex i både det naturliga och artificiella systemet. I Fotosystem II spjälkas vatten, varvid fler elektroner frigörs. Det artificiella systemet tar också elektroner från vatten, men inte lika effektivt ännu.

Naturlig fotosyntes – Artificiell fotosyntes



Från naturlig till artificiell fotosyntes

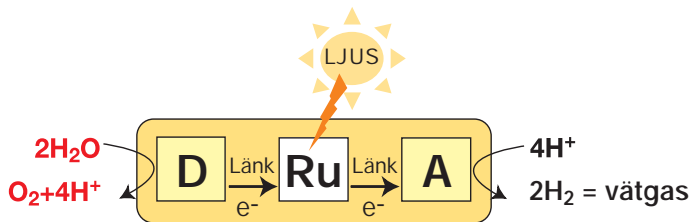
Inom konsortiet för artificiell fotosyntes arbetar man med principer hämtade från naturen, men utvecklar också nya kemiska system som inte har sin motsvarighet i naturen. Istället för klorofyll, använder man syntetiska föreningar med ädelmetallen rutenium som ljusinfångande material. De har egenskaper som liknar klorofyllets, det vill säga ruteniumkomplexen kan absorbera ljus och ge och ta elektroner på liknande sätt som klorofyllet i Fotosystem II.

Fördelen med rutenium framför klorofyll, är dels att det är stabilare, medan klorofyllmolekyler lätt bryts ner av ljus. Växterna har lärt sig leva med sin ljuskänslighet, genom att utveckla mekanismer för läkning och återhämtning. Ett artificiellt system måste å andra sidan vara driftsäkert i årtal utan underhåll. Dessutom är ruteniumkomplex lätta att använda som byggstenar när man bygger mer komplicerade molekyler.

Ett kemiskt modellbygge

Konsortiet utvecklar den artificiella fotosyntesen stegvis, genom att lägga bit till bit och gradvis bygga upp större molekyler. Målet är att skapa en supermolekyl där rutenium sitter ihop med mangan, i ett liknande arrangemang som i Fotosystem II. Tanken är att efterhärma det händelseförlopp som sker när växternas Fotosystem II omvandlar energin i solljuset till en kemiskt bunden form. Så här ska det artificiella systemet fungera:

Energiomvandling i ett artificiellt system



Artificiell fotosyntes

I ett framtida solenergisystem fångar rutenium-komplexet (Ru) in ljus. Elektroner (e-) strömmar då från donatordelen (D) till acceptordelen (A). Elektroner hämtas från vatten (H₂O), precis som i naturens fotosyntes. På acceptorsidan används elektronerna och vätejonerna (H⁺) från det spjälkade vattnet för att göra vätgas (H₂).

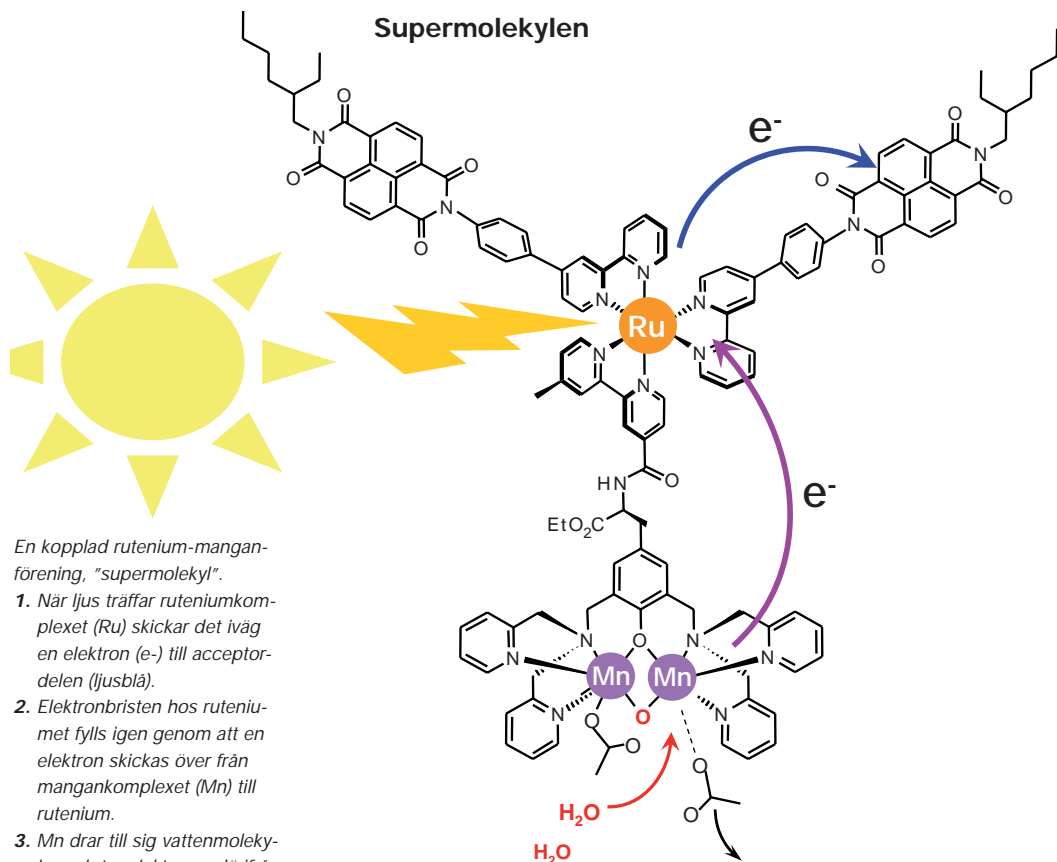
När ljuset träffar ruteniumet (Ru) skickas en elektron till acceptordelen (A) av supermolekylen. Elektronhållet i ruteniumkomplexet fylls igen när en elektron transporteras från mangankomplexet (Mn) till rutenium. Mangankomplexet tar i sin tur elektroner från vattenmolekyler (H₂O). Resultatet av den här händelsekedjan blir att det frigörs elektroner som kan användas till att bilda ett bränsle. Dessutom bildas vätejoner (H⁺) och syrgas (O₂). Så långt vill man härma det som sker i den naturliga fotosyntesen.

Det viktiga är vad man sedan gör med med elektronerna, det vill säga hur energin binds och lagras. Här tänker sig konsortiet en annorlunda lösning än växternas. Vi människor är ju intresserade av att få ut ett bränsle så effektivt som möjligt. Därför ska elektronerna och vätejonerna sättas ihop till vätgas med hjälp av en kemisk katalysator.

Från idé till verklighet

När forskningsprojektet började 1994, fann forskarna att det var svårt att koppla ihop rutenium och mangan i samma förening, och det tog tid innan den första molekylen fick sin form. Den allra första molekylen bestod av ett ruteniumkomplex kopplat till en löst bunden manganjon. Detta första steg visade att idén höll, att de bägge metallerna kunde sättas ihop, och det viktigaste av allt: att en elektron kunde transporteras från manganet till ruteniumet med hjälp av ljus.

Nästa steg blev att införa fler än en manganjon. I Fotosystem II finns fyra manganjoner som tillsammans utför vattenspjälkningen. Inom forskarsamhället har man länge trott att det också krävs fyra manganer för att spjälka vatten: en mangan för varje elektron som dras ut innan det kan bildas syrgas. Det är kemiskt svårt att sätta ihop fyra manganjoner, så till en början nöjde man sig med två. Det visade sig fungera över förväntan.



I supermolekylen på bilden sitter två manganjoner kopplade till ett ruteniumkomplex på ena sidan. På andra sidan sitter två acceptormolekyler. När ruteniumet absorberar ljusenergi, transporteras en elektron till acceptordelen och en elektron transporteras från mangankomplexet till ruteniumet. Så långt fungerar molekylen som förväntat. Resultatet, som forskarna i konsortiet inte hade väntat sig, är att mangankomplexet kan skicka tre eller fyra elektroner till ruteniumdelen, trots att det bara har två manganjoner. Nästa överraskning var att manganjonerna faktiskt kan ta elektroner från vatten. Visserligen är vattenspjälkningen inte lika effektiv som i Fotosystem II ännu, men kanske tillräckligt bra för att en lösning på vattenspjälkningens gåta kan vara nära förestående.

Den avgörande nöten konsortiet måste knäcka är att få mekanismen att gå runt, att få systemet att återställa sig självt så att fler vattenmolekyler kan spjälkas och processen blir hållbar.

En världssensation

Idag har konsortiet för artificiell fotosyntes producerat nära ett femtiotal olika mangan- och ruteniumföreningar. Molekylen på bilden är den mest avancerade, och är faktiskt en liten världssensation, åtminstone på forskningsnivå. Denna molekyl är den enda konstgjorda i världen, som kombinerar flera viktiga byggstenar för ett artificiellt fotosystem med helt unika fotokemiska egenskaper. Den kan för det första flytta fler än en elektron. När plusladdningar och minusladdningar på så vis befinner sig på olika platser i molekylen, kallas det ett laddningsseparerat tillstånd. Den andra unika egenskapen med supermolekylen är att laddningsseparationen i den är ovanligt långlivad.

Långlivad laddningsseparation är något man känner till från naturen. I Fotosystem II är vattenspjälkningen en ”långsam” process (en tusendels sekund är lång tid på kemisk tidsskala!). Därför måste den transporterade elektronen bindas upp tillräckligt lång tid för att vattenspjälkningen ska hinna äga rum, så att man kan använda energin och göra ett bränsle. Inom forskningen kring artificiell fotosyntes har de kortlivade laddningsseparationerna länge varit en stötesten, men konsortiets forskare har nu lyckats att återskapa liknande tidsskalor som i Fotosystem II. Det ger i sin tur en väldigt bra utgångspunkt för vidareutvecklingen av systemet.

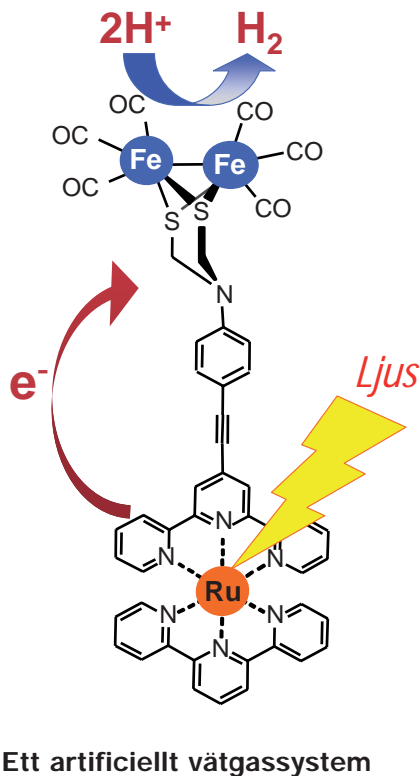
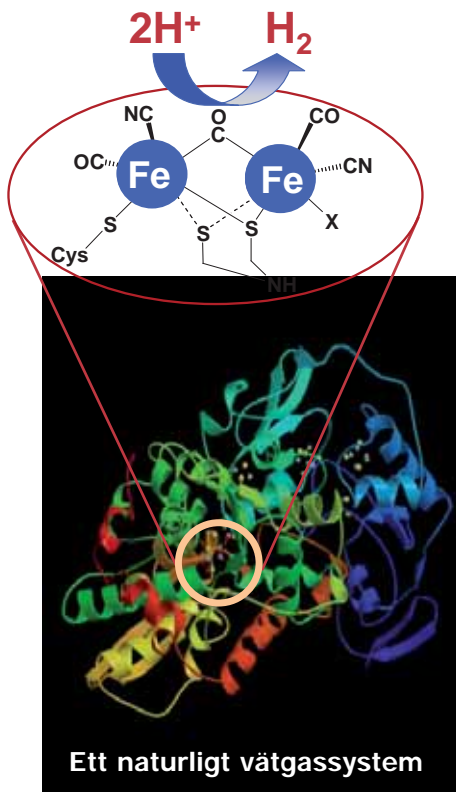
Hållbara resultat

Här står alltså forskningen i dagsläget: Man har lyckats skapa en supermolekyl som absorberar ljus, och med ljusenergin hjälp flyttar elektroner till en acceptormolekyl. Flera elektroner kan transporteras från ett mangankomplex i molekylen, och manganerna tar i viss utsträckning elektroner från vatten. Så långt har man lyckats väl med att härma flera av nyckelstegen i naturens Fotosystem II. Dessa är hållbara resultat som gör att konsortiet ser ljus på framtiden.

Det återstår att framställa ett mangankomplex som kan spjälka vatten katalytiskt, alltså att systemet ska kunna ta elektroner från vatten om och om igen, så att det blir användbart och driftsäkert. Acceptorsidan, alltså den del som tar emot elektronerna, ska också göra nytta. Konsortiet arbetar för fullt på att utveckla den del av supermolekylerna som skall producera vätgas.

Biomimetiska katalysatorer bildar vätgas

Många mikroorganismer har särskilda enzymer (biologiska katalysatorer) som kallas hydrogenaser. Hydrogenaserna kan sätta ihop vätejoner



Ett naturligt hydrogenas (vänster) som utvecklar vätgas. Den biomimetiska katalysatorn (höger) har ett järnkomplex som liknar naturens, och som kan producera mycket vätgas under kontrollerade betingelser. Inom en snar framtid kommer det att fungera såhär: När ruteniumkomplexet absorberar ljus, skickas en elektron (e^-) till järnkomplexet. När järnet fått två elektroner, reagerar komplexet med två vätejoner (H^+), och det bildas vätgas (H_2).

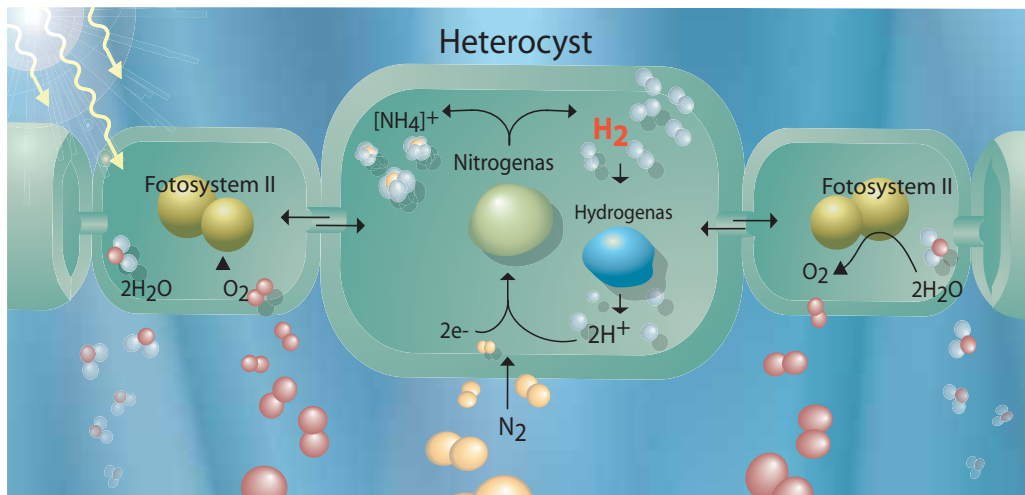
och elektroner så att det bildas vätgas. De så kallade järn-järn-hydrogenaserna, har två järnatomer i sitt aktiva centrum. Liknande katalysatorer kan tillverkas på syntetisk väg, och konsortiet för artificiell fotosyntes arbetar därför med att koppla ihop sina supermolekyler med sådana katalysatorer.

Under de senaste fyra åren har man har experimenterat med hur de olika järn-järnföreningarna skall sättas samman. Resultaten lät inte vänta på sig; konsortiet har nu framställt katalysatorer som producerar vätgas katalytiskt och med högt utbyte, under kontrollerade betingelser. Målet är att vätgasproduktionen skall drivas med hjälp av ljus, men det krävs ytterligare utveckling för att nå det målet.

Vätgasproducerande bakterier stimulerar nytänkandet

Cyanobakterier och grönalger är mikroorganismer som kan producera vätgas från solljus och vatten. De har redan det maskineri som forskarna

I cyanobakterier finns heterocyster som producerar vätgas



i artificiell fotosyntes försöker utveckla på konstgjord väg. Naturens vätgasutvecklande system utgör därför en inspirationskälla till den artificiella fotosyntesen.

Men den naturliga vätgasproduktionen i dessa organismer är väldigt liten, och det är i realiteten ännu inte möjligt att odla cyanobakterier för vätgasutvinning. Därför arbetar två av konsortiets forskningsgrupper med att förändra cyanobakterierna på genetisk väg, så att de producerar mycket vätgas med solen som energikälla.

Liksom alla levande varelser har cyanobakterier utvecklats för att hushålla med sin energi. I bakteriernas ämnesomsättning bildas det naturligt lite vätgas. Den tar bakterierna hand om, eftersom vätgas är ett energirikt ämne. En strategi för att få cyanobakterierna att släppa ifrån sig vätgasen, istället för att de "äter upp" den själva, är att slå ut de gener som på olika sätt styr hur bakterien tar upp vätgas. Även i detta forskningsområde ligger konsortiet långt framme.

Arbetet med cyanobakterier medför delvis andra utmaningar än den artificiella fotosyntesen, så en viktig komponent i arbetet är tankeutbyte och kommunikation kollegor emellan. I mötet mellan biologi och kemi kan oanade och fruktbare idéer uppstå. Därför pågår forskningen om den biologiska vätgasproduktionen parallellt med arbetet med de artificiella molekylerna.

Cyanobakterier är fotosyntetiska (ljuslevande) mikroorganismer som kan utveckla vätgas från sol och vatten. Bilden föreställer en sorts celler, så kallade heterocyster, som kan ta upp luftens kväve och omvandla det till näring. När detta sker bildas vätgas som restprodukt. Den energirika vätgasen tas omhand av cellens avancerade maskineri. Konsortiet arbetar med att tämja cyanobakterierna på genetisk väg, så att de lämnar ifrån sig vätgasen.

Det går framåt!

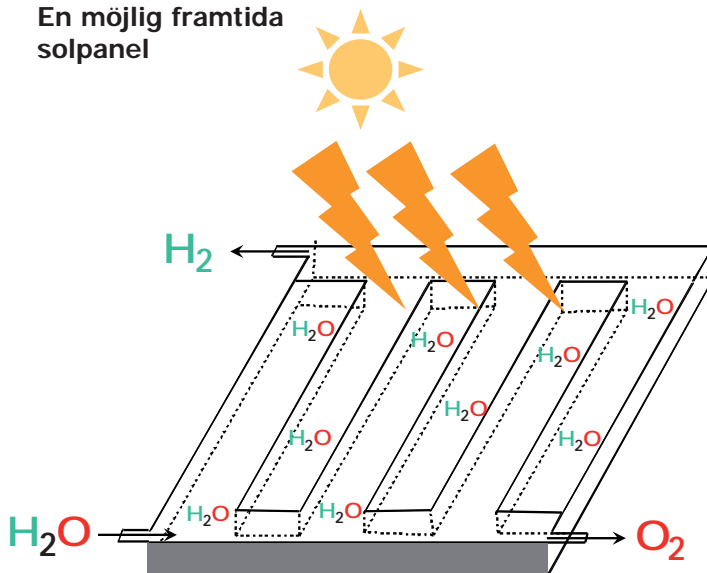
Sammanfattningsvis har forskningen om artificiell fotosyntes kommit en bra bit på väg de senaste fyra-fem åren.

- Man har skapat en "supermolekyl" bestående av en ljusabsorberande del, en donatordel och en acceptordel. Supermolekylen härmar viktiga delar av naturens Fotosystem II. Den har den stabilaste laddningsseparationen av alla syntetiska molekyler av liknande typ, som någonsin uppmäts.
- Molekyler som utvecklar vätgas katalytiskt har skapats, med naturliga hydrogenaser som förebild. De nya katalysatorerna är bland de mest effektiva vätgasproducenterna som någon forskare framställt.
- Den stora gåtan inom forskningen – hur vatten spjälkas till syrgas – är på väg att lösas, tack vare studierna av syntetiska mangankomplex. De kemiska föreningarna som konsortiet har arbetat med i flera år, har visat sig kunna reagera med vatten på ett sätt som kan bli användbart.

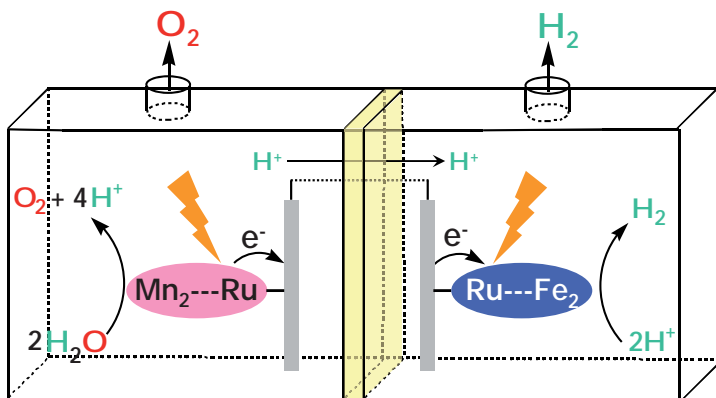
Det återstår en del arbete innan drömmen kan bli verklighet. Vattenspjälkningen måste bli katalytisk, det vill säga hållbar över tiden. Vätgasproduktionen skall kunna drivas med ljus. När man kommit så långt, kan utvecklingen av en solenergiapparat börja på allvar.

En möjlig framtida solpanel

Artificiella supermolekyler befinner sig i två utrymmen åtskilda av ett membran. I det ena spjälkas vatten och syrgas produceras, i det andra produceras vätgas av elektroner och vätejoner.



En solbränsleapparat



En solbränsleapparat kan komma att fungera så här: Ett rutenium-mangankomplex träffas av solljus och avger elektroner. Komplexet spjälkar vattenmolekyler för att få ut elektronerna, och det bildas då syrgas och vätejoner. Vätejonerna vandrar genom membranet till andra sidan där ett rutenium-järnkomplex finns. När ljus träffar det komplexet, fogas vätejonerna samman med elektronerna och det bildas vätgas.

Framtiden

Hur kommer de framtida solbränsleapparaterna att se ut? Man kan tänka sig ett system på två sätt: Antingen sitter alla delar ihop i en enda supermolekyl, och att en mängd sådana supermolekyler sitter i en solcell, och med hjälp av solenergi spjälkar vatten i den ena ändan och pysar ut vätgas i den andra.

Man kan också tänka sig att man delar på processerna. Att det sitter vattenspjälkande molekyler på ett ställe, som producerar elektroner och vätejoner, medan andra molekyler på ett annat ställe producerar vätgas av elektronerna och vätejonerna. Båda grupperna av molekyler drivs då av solljus.

Båda lösningarna är tänkbara och har olika fördelar, men det är ännu för tidigt att säga vilket som kommer att vara det vinnande konceptet. Än så länge är konsortiets arbete på grundforskningsnivå. Det betyder att man arbetar med att lösa de fundamentala principerna för artificiell fotosyntes. Någon pilotmodell finns inte ännu, men man kan alltid spekulera i hur det kan komma att se ut.

En möjlighet är en typ av solpanel, som skulle kunna sitta på outnyttjade ytor, till exempel hustak. När hela apparaten fungerar puttrar det ut livgivande syre i ena änden, och den värdefulla vätgasen i den andra. Vätgasen kan användas direkt, eller lagras ner i speciella vätgasabsorberande material, så kallade metallhydrider. Förhoppningen är att systemet ska kunna vara självgående, så att allt man behöver göra är att "tänka" det med lite vatten då och då. Man kan tänka sig att apparaten är byggd i moduler, så att delar av den kan monteras isär för underhåll. En annan

viktig aspekt är att en solbränsleapparat behöver kunna byggas i vilken storlek som helst. Det innebär minskade transporter, vilket underlättar integrationen av vätgasteknik i samhället.

Utsikter

Hur nära är drömmen om en sant förnybar energikälla att bli förverkligad? Idag vet man inte hur man skall göra för att omvandla solljus hela vägen till bränsle, men man vet hur man gör om ljusenergi till kemisk energi, och hur man tillverkar vätgas på kemisk väg. Att koppla ihop kunskapen från olika områden, är en av utmaningarna i forskningen. Det är svårt att uppskatta hur lång tid det kommer att ta. Upptäckter och intelligenta lösningar kommer ofta plötsligt och språngvis. Man hoppas kunna demonstrera konceptet inom 5-10 år, och de första fungerande solbränsleapparaterna om 15-20 år.

Förhoppningen är att kunna ersätta miljöbelastande energikällor med en ren, förnybar och överallt tillgänglig energiform. Artificiell fotosyntes för framställning av bränsle från sol och vatten har potential att uppfylla denna förhoppning. Fortfarande är det långt kvar och det krävs omfattande insatser från duktiga och fantasirika forskare. Annars förblir detta bara en dröm.

Vill du veta mera?

Vi svarar på frågor:

Stenbjörn Styring – Professor, ordförande för konsortiet

Ann Magnuson – Docent, huvudförfattare av den här kunskapsöversikten

På konsortiets hemsidor kan du läsa om forskningen och om vilka forskarna är.
www.fotomol.uu.se



Konsortiet för Artificiell Fotosyntes finns på Institutionen för Fotokemi och Molekylärvetenskap vid Uppsala Universitet, samt på Avdelningen för Kemisk Fysik vid Lunds Universitet.

En effektiv och miljövänlig energiförsörjning

Energimyndigheten arbetar för ett tryggt, miljövänligt och effektivt energisystem i Sverige och internationellt. Myndigheten verkar för effektivare energianvändning och en ökad andel förnybar energi, och har också ansvar för landets energiberedskap. En viktig del av arbetet är att finansiera forskning, utveckling och demonstration inom energiområdet.

Denna kunskapsöversikt beskriver forskningsområdet Artificiell Fotosyntes. Det syftar till att producera vätgas med hjälp av solljus och vatten i en fotokemisk process. Metoden härmar den naturliga fotosyntesen. Nyckelreaktionen handlar om att spjälka vatten.

Vätgas är ett bränsle som inte släpper ut någon koldioxid vid användning. Om man även kan utveckla en energieffektiv och utsläppsfri produktion av vätgas, blir den en av flera intressanta energibärare för ett uthålligt energisystem. Om forskningen kring artificiell fotosyntes lyckas kan den ge oss betydande bidrag till uthållig vätgasproduktion.