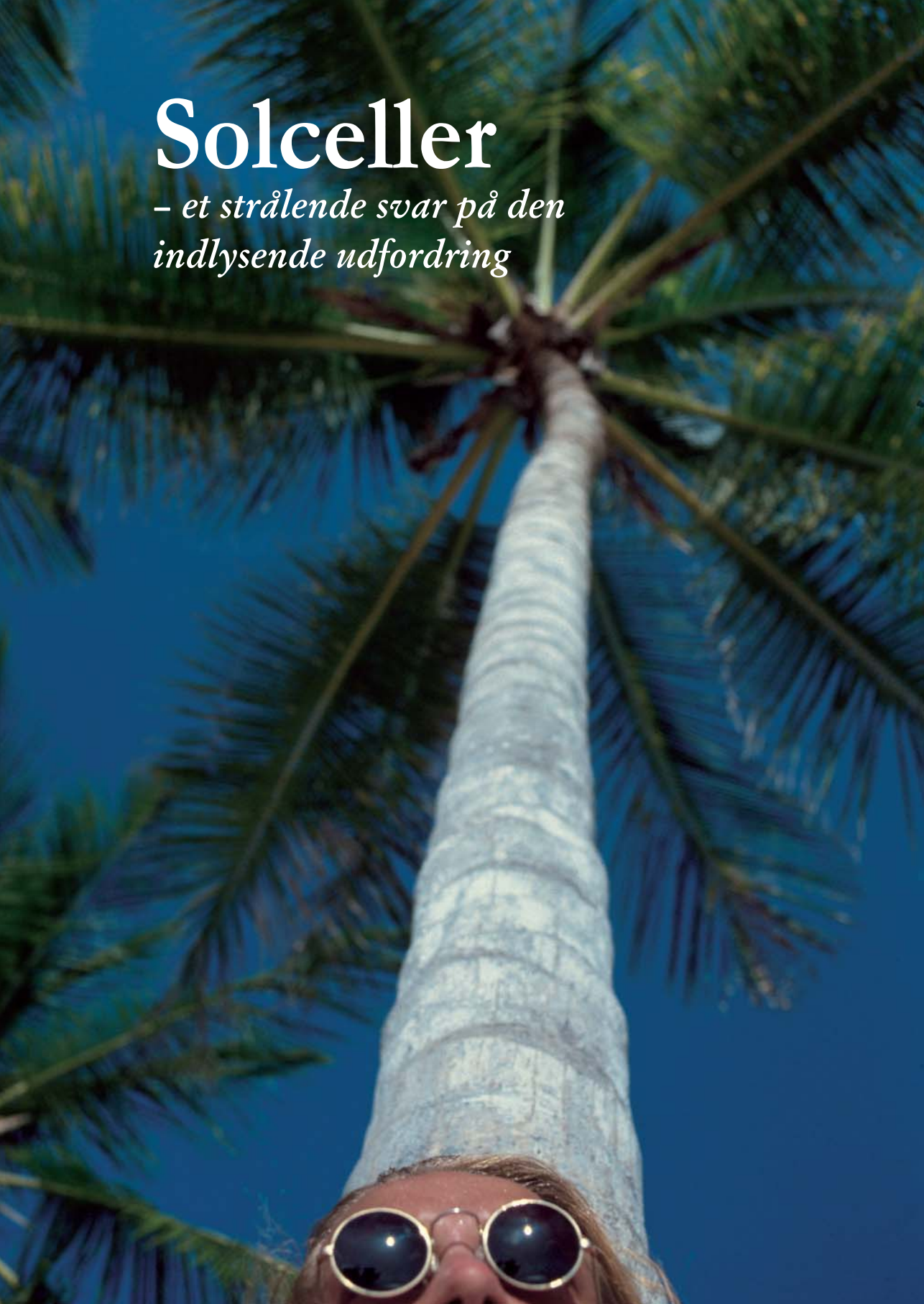


Solceller

*– et strålende svar på den
indlysende udfordring*



Vores tids formodentlig største udfordring er det store og stærkt voksende energibehov. Det samlede "forbrug" af energi for hele jordens befolkning blev i 2005 anslået til at være 14 TW. Dette "forbrug" forventes at vokse til det dobbelte i år 2050! I dag dækkes vores energibehov langt overvejende ved afbrænding af fossile resurser, som naturgas, olie og kul og i mindre grad ved atomkraft og brug af vedvarende energikilder. Dette scenarium kan naturligvis ikke fortsætte uændret i fremtiden, da vi allerede nu ser ud til at være ved at løbe tør for olie og naturgas og på længere sigt også vil løbe tør for kul. Som verdenssamfund er vi altså nødt til at blive bedre til at udnytte fornybare resurser til at dække vores energibehov. Her kommer solen ind i billedet, og der er store perspektiver i at udnytte dens enormt righoldige energi gennem solceller. Vi har allerede taget de første skridt mod at høste denne energi, men der er lang vej tilbage, før vi for alvor kan tale om at udnytte solen effektivt. Udfordringen er central, for en forbedret udnyttelse af solens energi kan på længere sigt vise sig at være den eneste mulige løsning på vores klodes voksende energiforbrug.

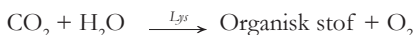
Vejen til en lysere fremtid

Verden står formentlig over for en energimæssig krise af hidtil usete dimensioner: Inden 2050 *skal* vi som minimum blive i stand til at tilvejebringe mindst dobbelt så meget udnyttelig energi pr. år, som vi i øjeblikket gør. Og en stor del af denne energimængde *skal* vi tilmed være i stand at tilvejebringe på en miljømæssig forsvarlig måde, hvis vi skal undgå en økologisk katastrofe. En af løsningerne på vores energiproblem kan være en mere effektiv udnyttelse af den energi, vi får stillet til rådighed gennem solens lys.

Solen og dens lys har altid haft afgørende betydning for alt liv på jorden. Faktisk er den en

forudsætning for livets eksistens, da solen igennem opvarmning og fotosyntese er den direkte kilde til størstedelen af den udnyttelige energi, der findes på jorden.

Fotosyntese:



Solen er en ubegribelig stor og i praksis udtømmelig energikilde. Dens kæmpemæssige energiproduktion stammer fra fusionsprocesser, hvorved hydrogen omdannes til helium under samtidig frigivelse af enorme mængder energi. Samlet set er solens udstrålingsenergi omkring $3,8 \cdot 10^{14}$ TW, men det er kun en lille del af denne enorme energi, der rammer jor-

den, nemlig $1,7 \cdot 10^5$ TW. Hvis vi kunne udnytte al denne energi, eller i virkeligheden bare en brøkdel af den, ville vi have en løsning på vores energiproblem, så længe solen eksisterer. For at kunne realisere denne drøm, er vi nødt til at udvikle effektive og billige solceller.

En solcelle er en celle, der er i stand til at omdanne sollys til elektrisk energi. Ofte kaldes solceller også fotovoltaiske celler efter fællestrekket for alle solceller, nemlig at de giver anledning til en spændingsforskel, når de bestråles med lys. Med betegnelsen fotovoltaiske celler undgår man desuden at forveksle solceller med solvarmeanlæg, der ikke producerer elektricitet, men i stedet omdanner solens lys direkte til varme. Der er rigtig mange gode grunde til, at solceller skal indgå som løsning på vores voksende energiudfordring. Først og fremmest er sollys en vedvarende, CO_2 -neutral og dermed bæredygtig energikilde, og så er den altid direkte tilgængelig for os. Solceller kan desuden producere elektricitet uden samtidig at generere nogen som helst form for affald eller spildprodukter, der kan forurene miljøet. Derudover er solceller stabile og har lang levetid samt et lavt vedligeholdelsesniveau, da de ikke indeholder nogen mekaniske dele. Et af de vigtigste økonomiske aspekter er at solceller nemt kan masseproduceres, og det er let at tilpasse slutproduktet til det ønskede formål, hvad enten det er en lommeregner eller en mindre by. På trods af alle disse fordele er solceller dog stadig i dag for dyre til at spille en afgørende rolle i energiforsyningen.

Solceller i historisk lys

Det første tegn på at sollys overhovedet kan omdannes til elektricitet blev vist tilbage i år 1839 af den franske fysiker Edmond Becquerel. I en alder af bare 19 år opdagede han, at han kunne lave strøm ved at udsætte en elektrolytisk celle for sollys. Dermed havde

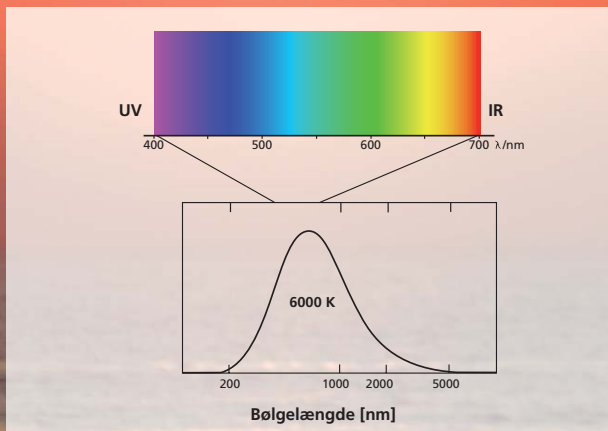
Becquerel observeret, at der i visse materialer dannes en spændingsforskel, når materialet absorberer lys.

Det er typisk i halvledere med et båndgab mindre end den energi, som findes i sollys, at der kan dannes en spændingsforskel, når halvlederen udsættes for synligt lys (læs mere om halvledere senere i dette kapitel). Den første egentlige solcelle baseret på udnyttelse af den fotoelektriske effekt blev fremstillet i 1883 af Charles Fritts og bestod af selen (halvleder) belagt med et ekstremt tyndt lag af guld (mod-elektrode). På trods af at Fritts' solcelle ikke var i stand til at omdanne mere end ca. 1 % af den solenergi, der ramte cellen til elektrisk energi, skulle der gå rigtig mange år, før markant mere effektive solceller så dagens lys.

De første moderne solceller blev opdaget ved en tilfældighed i 1954, da forskere ved Bell Laboratorierne i USA opdagede, at når halvlederen silicium var "foruren" med visse urenheder, blev den meget følsom overfor sollys. Faktisk blev materialet så følsomt, at de solceller forskerne kunne fremstille var i stand til at omdanne hele 6 % af den tilførte solenergi til elektricitet. Det lyder måske ikke umiddelbart af meget, men det var en så markant forbedring i forhold til eksisterende solcelleteknologi, at det nu var muligt at producere solceller, der kunne anvendes i praksis. Specielt så man store perspektiver i at bruge solceller på meget øde lokaliteter, hvor normal energiforsyning ikke var mulig. Allerede i 1958 blev denne vision ført ud i livet, da Vanguard I som den første satellit benyttede solceller til at danne strøm. Siden voksede udviklingen af og forskningen i solceller enormt, i høj grad som følge af store statslige investeringer under det daværende rumkapløb mellem USA og USSR.

Solens energi

Ufattelige mængder af energi i form af lys bliver hele tiden udsendt fra solen, der har en temperatur på næsten 6000 K og en diameter på $1,39 \cdot 10^9$ m. En del lille del af denne energi rammer jorden 8 minutter og 20 sekunder senere og $1,5 \cdot 10^{11}$ m væk.



Jorden rammes hvert sekund af solenergi med en effekt på $1,7 \cdot 10^5$ TW (T = tera = 10^{12}), hvilket svarer til følgende mængde energi:

$$1,7 \cdot 10^5 \text{ TW} = 1,7 \cdot 10^{17} \text{ W} = 1,7 \cdot 10^{17} \text{ J/s}$$

Den samlede mængde energi, der rammer jorden i løbet af 1 år, er altså ($1 \text{ år} = 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 31\,557\,600 \text{ s}$):

$$31\,557\,600 \text{ s} \cdot 1,7 \cdot 10^{17} \text{ J/s} = 5,4 \cdot 10^{24} \text{ J}$$

Dette svimlende tal kan selvfølgelig omregnes til enheder, som kemikere oftere benytter, f.eks. kJ/mol (eller eV), da vi kender Avogadros tal $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ og da $1 \text{ J} = 10^{-3} \text{ kJ}$:

$$5,4 \cdot 10^{24} \text{ J} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 3,3 \cdot 10^{48} \text{ J/mol} = 3,3 \cdot 10^{45} \text{ kJ/mol (eller } 3,3 \cdot 10^{43} \text{ eV)}$$

Tilsvarende beregninger kan man også lave for vores energiforbrug på jorden, da det blev anslået at være 14 TW i 2005, og man regner med en fordobling til 28 TW i 2050:

$$(2005): 14 \text{ TW} \cdot 31\,557\,600 \text{ s} = 4,4 \cdot 10^{20} \text{ J}$$

$$(2050): 28 \text{ TW} \cdot 31\,557\,600 \text{ s} = 8,8 \cdot 10^{20} \text{ J}$$

Fra disse beregninger kan vi se, at i løbet af 2005 var den energi, der blev brugt under 1:10 000 del af den solenergi, der ramte jorden:

$$\text{Forbrugt energi/indsendt energi} = 4,4 \cdot 10^{20} \text{ J} / 5,4 \cdot 10^{24} \text{ J} = 8,1 \cdot 10^{-5}$$

Vi kunne altså i teorien have fået al den energi, vi brugte i hele 2005 på bare 1:10 000 år! Dette svarer til ca. 43 minutter:

$$1 \text{ år} \cdot 8,1 \cdot 10^{-5} = 31\,557\,600 \text{ s} \cdot 8,1 \cdot 10^{-5} = 2556 \text{ s} = 43 \text{ minutter}$$

Solceller i praksis

Inden for solcelleforskningen sker der regelmæssige fremskridt, som med tiden forventes at gøre teknologien stadigt mere konkurrencedygtig. I dag findes en række forskellige solcelletyper, der både konkurrerer indbyrdes om at være mest energieffektive og økonomiske, og samtidigt konkurrerer med de øvrige energiteknologier som atomkraft, vindkraft og biomasse samt de fortsat altdominerende teknologier baseret på fossile resurser.

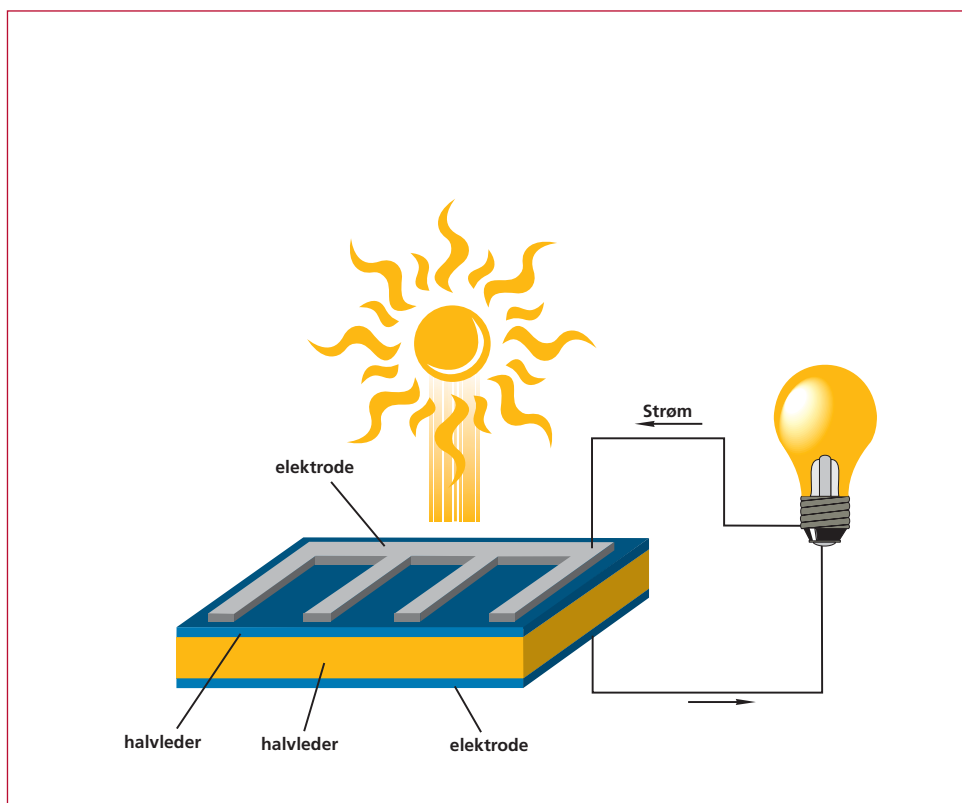
Solceller inddeles i første-, anden- og tredje-generationssolceller. Første- og andengenerationssolceller er baserede på halvledere, mens begrebet tredje-generationssolceller dækker over flere forskellige celletyper, f.eks. polymersolceller, fotoelektrokemiske solceller og

nanokrystallinske solceller. Her vil vi beskrive virkemåden af fotoelektriske solceller og af den berømte Grätzelcelle i større detalje.

Fotoelektriske celler

Fotoelektriske celler udnytter den fotoelektriske effekt, og i princippet virker de alle på samme måde, når de omdanner sollys til elektricitet. I figur 1 ses en skitse af en sådan fotoelektrisk celle.

Der er grundlæggende blot tre nødvendige elementer i omdannelsen af sollyset (fotoner) til elektricitet i en sådan celle. Det første element er en halvleder, der ved absorption af sollys kan danne et elektron-hul par, bestående af en fri elektron og et såkaldt ”hul”, altså den

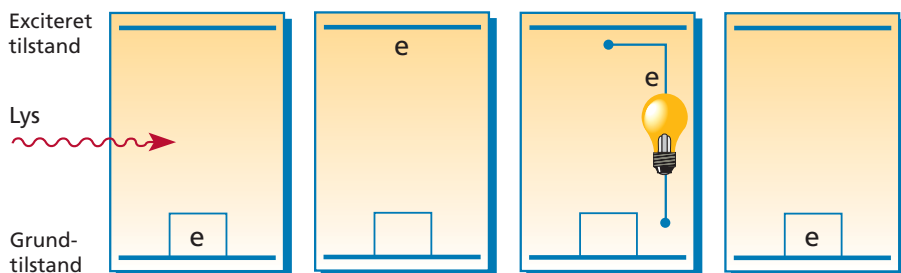


Figur 1. En fotoelektrisk halvleder solcelle.

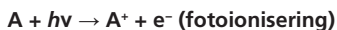
Den fotoelektriske effekt

Populært sagt handler *den fotoelektriske effekt* om at generere elektricitet fra fotoner. Den fotoelektriske effekt er det kvantemekaniske fænomen, der giver sig til udtryk i at elektroner kan løsnes fra et hvilket som helst materiale, hvis det udsættes for fotoner med tilpas høj energi. Den fotoelektriske effekt blev opdaget i 1887 af den tyske fysiker Heinrich Rudolf Hertz, men blev først forklaret af Albert Einstein i 1905. Det var for forklaringen af den fotoelektriske effekt, at Albert Einstein modtog Nobelprisen i fysik i 1921. I bredere forstand dækker den fotoelektriske effekt over en hvilken som helst vekselvirkning mellem elektromagnetisk stråling og stof, der resulterer i frigivelse af ladede partikler.

Der er to særtilfælde af *den fotoelektriske effekt*, der har betydning for forståelsen af hvordan solceller virker. Først og fremmest er der den fotovoltaiske effekt, der i sin enkelthed går ud på, at der kan dannes en spændingsforskel mellem to forskellige materialer i tæt kontakt, når de udsættes for lyspåvirkning. Materialer der udviser dette fænomen er typisk halvledere med et båndgab, som er mindre end den energi, der er i synligt lys. Absorption af lys i en halvleder med passende båndgab, resulterer i dannelse af et elektron-hul par ved, at en elektron flyttes fra valensbåndet til ledningsbåndet således, at der i valensbåndet opstår et hul. Spændingsforskellen opstår, fordi der for elektroner vil være en energiforskel mellem at løbe den ene eller den anden vej mellem to forskellige materialer.



Det andet særtilfælde kaldes *fotoionisering* og dækker i sin enkelthed over lys-stimuleret ionisering af et molekyle:



For at et molekyle skal kunne fotoioniseres, skal det altså først og fremmest kunne exciteres af synligt lys, dvs. det skal være farvet. Derudover skal det kunne oxideres således, at det exciterede molekyle kan ioniseres.



Kapitlets forfattere er fra venstre ph.d. studerende Kresten Egeblad, ph.d. studerende Søren Kegnæs Klitgaard og professor Claus Hviiid Christensen. Som det ses, skinner solen ikke altid.

ledige plads, hvorfra elektronen blev løsrevet. Det andet element er en halvlederovergang, som gør det muligt effektivt at separere den løsrevne elektron fra det dannede hul, så disse ikke blot rekombinerer. Halvlederovergangen sikrer med andre ord, at elektronen ikke blot hopper tilbage i det dannede hul. Det tredje element i en fotoelektrisk celle er elektriske kontakter placeret på cellens front og bagside, hvorved et elektrisk kredsløb kan sluttes og solcellen forbindes til en ydre komponent.

Ser vi nu lidt nærmere på de tre nødvendige elementer i solcellen, kan vi let opnå en dybere indsigt i dens virkemåde. Det første element er halvlederen, der absorberer sollyset. En halvleder er karakteriseret som et materiale, der har en elektrisk ledningsevne, der ligger mellem ledningsevnen for gode elektriske ledere og egentlige isolatorer. Typisk er det materialer med en resistivitet på mellem 10^{-5} og $10^7 \Omega \text{ m}$. Man siger ofte, at halvledere har et vist båndgab, dvs. elektronerne hovedsaglig findes i en

tilstand, hvori de ikke kan bidrage til materialets ledningsevne. I en klassisk fortolkning betyder det, at elektronerne er lokaliserede i bindingerne mellem de atomer, som halvlederen er opbygget af. Det angives som, at elektronerne befinder sig i valensbåndet. Tilfører man derimod energi til halvlederen svarende til båndgabets størrelse eller mere, kan man excitere elektroner til det såkaldte ledningsbånd, hvori de ikke længere er lokaliserede på de enkelte atomer, men er frie til at bevæge sig. I gode, metalliske ledere er der intet båndgab, så elektronerne kan frit bevæge sig rundt, mens båndgabets i isolatorer derimod er så stort, at elektronerne i praksis er næsten umulige at excitere fra valensbåndet til ledningsbåndet.

Ser vi igen på halvledere, er det generelt sådan, at deres ledningsevne stiger med temperaturen, da den tilførte energi (varme) gradvis får flere og flere elektroner til at exciteres fra valensbåndet og til ledningsbåndet, hvorfra de kan bidrage til at bære den elektriske strøm. I sol-

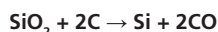
celler er specielt halvledere med et båndgab, der svarer omtrent til energien af sollys, interessante. Når en sådan halvleder bestråles med sollys (fotoner), kan energien fra fotonen excitere en elektron fra valensbåndet til ledningsbåndet. På denne måde skaber man altså det førnævnte elektron-hulpar.

Det andet centrale element i solcellen er halvlederovergangen, der skal sikre, at de løsrevne elektroner kan vandre og ikke bare momentant falder tilbage i de dannede huller og bliver til varme. En halvlederovergang kan opnås ved at sætte en ”elektronrig” halvleder sammen med en ”elektronfattig” halvleder. De to typer kaldes normalt henholdsvis n-type og p-type halvledere, hvor n står for negativ og p for

positiv. Når den elektronrige (n-type) og elektronfattige (p-type) halvleder sættes sammen, vil nogle elektroner hoppe fra den elektronrige halvleder (n-type) til den elektronfattige (p-type), hvorved n-type halvlederen vil få en lille partiel positiv ladning og p-type halvlederen en tilsvarende lille partiel negativ ladning. Hermed dannes nærmest momentant et permanent elektrisk felt, som derved forhindrer yderligere elektrontransport. Hvis der ikke etableres elektrisk kontakt mellem p-type og n-type halvlederen, vil transporten af elektroner altså stoppe næsten øjeblikkeligt. Forbindes de to halvledere derimod via en ydre komponent, kan der løbe en strøm imellem dem, så længe der sendes lys ind på cellen.

Fremstilling af silicium

Omkring 28 % af jordens skorpe består af silicium, hvilket gør det til det næstmest hyppige grundstof i jordskorpen efter oxygen. Silicium indgår i mange mineraler som f.eks. kvarts (SiO_2). Silicium udvindes fra SiO_2 ved at reducere med kul ved meget høj temperatur:



Med en renhed på ca. 96-99 % er silicium fremstillet på denne måde dog langt fra rent nok til brug i halvlederindustrien, som kræver silicium med maksimalt 1 ppb (1:1 000 000 000) urenheder! Der findes to metoder til at renfremstille silicium til brug i halvlederindustrien: Zone-smeltning og Czochralskiprocessen. Begge metoder baserer sig på, at man kan fjerne urenheder ved smeltning.

Ved zonesmeltning smeltes ”urene” stænger af silicium ved, at varmezonen bevæges i stangens længderetning. Da urenheder har en tendens til at forblive i den flydende ende, vil de så at sige bevæge sig ud af materialet i takt med, at den smeltede zone bevæges. Med zonesmeltning er det muligt at fremstille ultrarent silicium.

På trods af at det med zonesmeltningsteknologien er muligt at producere ultrarent silicium, bliver det meste af den silicium, der anvendes i halvlederindustrien krystalliseret ved den såkaldte Czochralskiproces. I Czochralskiprocessen trækkes en silicium podekrystal langsomt op af en digel, der indeholder smeltet silicium. Med Czochralskiprocessen er det muligt at producere meget store enkeltkrystaller af silicium. Til gengæld er den silicium der fremstilles ved Czochralskiprocessen ikke nær så ren som den man kan fremstille ved zonesmeltning, da urenheder fra smeltediglen kan ende i siliciumkrystallen.

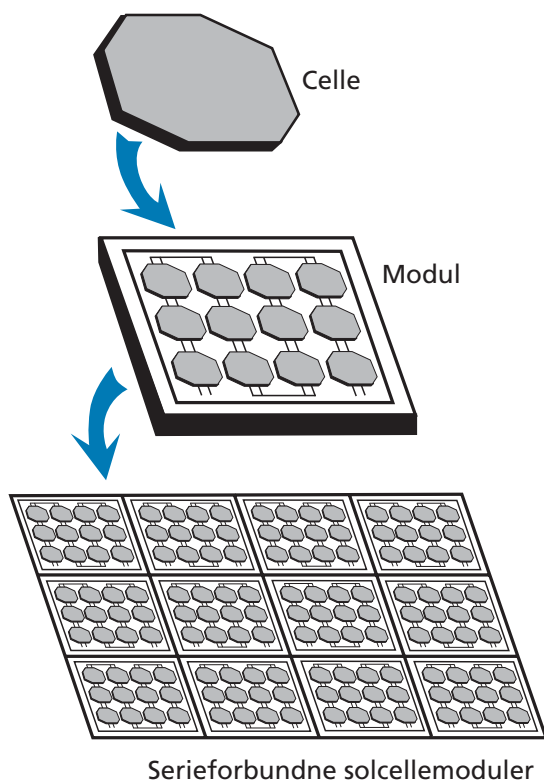
Siliciumsolceller

Langt den mest almindelige fotoelektriske celle er siliciumsolcellen, der i dag udgør over 80 % af alle kommercielle solceller. Langt det vigtigste materiale i siliciumsolcellen er, som navnet antyder, grundstoffet silicium.

Silicium er i sig selv en halvleder, og i praksis har det vist sig overordentlig let at modificere rent silicium til hhv. p-type – og n-type halvledermaterialer. Silicium befinder sig i gruppe 14 (hovedgruppe 4) i det periodiske system, hvilket betyder, at det har 4 elektroner i sin yderste elektronskal. Hvis man ”doper” eller ”forurener” silicium f.eks. med phosphor, der står i gruppe 15 (hovedgruppe 5) i det periodiske system, så bliver materialet til en n-type halvleder. Årsagen er selvfølgelig, at når phosphor indbygges i siliciumgitteret, så vil der disse steder være 5 elektroner, mens der ved hvert siliciumatom ellers kun er fire. Helt tilsvarende kan man ”forurene” silicium med bor, der står i gruppe 13 i det periodiske system (hovedgruppe 3). Ved hvert boratom, der indbygges i siliciumgitteret, vil der kun være 3 elektroner, og derved bliver materialet en p-type halvleder. Man kan altså forestille sig at lave en p-n overgang i en siliciumcelle ved at placere et lag p-type silicium tæt op imod et lag n-type silicium. I praksis laves p-n overgange dog ved at tage et lag p-type silicium og så dope det fra den ene side med en n-type forurening (eller omvendt). Siliciumsolceller findes i to hovedvarianter. Den ene variant består af polykrystallinsk silicium, hvilket kan ses ved, at solcellen er sammensat af mange tilfældigt orienterede krystaller. Denne type siliciumsolcelle er relativt billig, men også mindre effektiv, da der i grænsefladen mellem de enkelte krystaller ofte sker elektron-hul rekombination. Den anden type siliciumsolceller er monokrystallinske solceller, hvor cellen er opbygget af en enkelt siliciumkrystal. I en sådan er der ikke

grænseflader, hvor der let kan ske elektron-hul rekombination, og disse celler er derfor mere effektive. Til gengæld er de også dyrere, da det er meget omkostningskrævende at gro de nødvendige store siliciumkrystaller.

Ved belysning af en siliciumsolcelle opstår der en spændingsforskel på omkring 0,6 V. For at opnå større spændingsforskelle må man seriekoble et antal celler, og ved serieforbindelse af f.eks. 100 siliciumceller kan man så nå en spændingsforskel på 60 V. Den strøm, der kan



Figur 2. Flere solceller kan let samles i moduler som kan serieforbindes til større enheder.

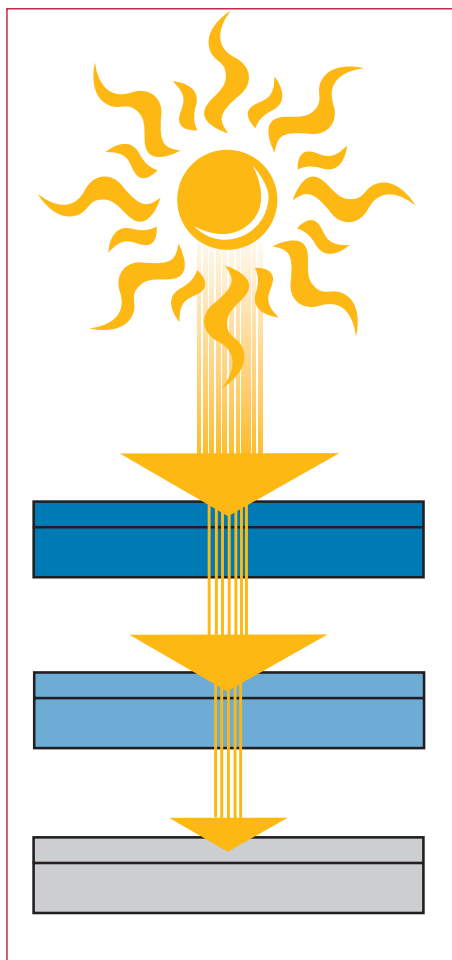
trækkes fra en solcelle, afhænger af dens areal, og af hvor meget lys der sendes ind på den. Ønskes en højere strøm end en enkelt solcelle kan levere, kan man parallelforbinde det nødvendige antal celler. Normalt fås solceller som moduler, der så kan bygges op til egentlige solcelleanlæg som vist på figur 2.

Effektiviteten af siliciumsolceller er typisk omkring 10-15 %, dvs. at kun en mindre del af solens lys effektivt omsættes til elektrisk energi. Udover tab i systemet er der også den begrænsning, at al det lys, der har mindre energi end båndgabets i solcellen selvfølgelig ikke kan udnyttes. I øjeblikket arbejdes der på at løse dette problem ved at fremstille solceller med multilagsovergange. I siliciumsolcellen er der kun en overgang. Men hvis man laver en celle med flere overgange, som vist skematisk i figur 3, så kan man udnytte mere af energien i solens lys. I dag er det på denne måde muligt at frembringe solceller med en effektivitet på ca. 35 %.

Hvis det lykkes at gøre disse celler tilstrækkeligt billige og driftsikre, vil de spille en afgørende rolle i fremtidens energiforsyning. Der er dog stadig kæmpeudfordringer, som skal løses, inden dette kan blive virkelighed.

Fotoelektrokemiske solceller – Grätzelceller

I slutningen af 1980'erne så en ny type solceller dagens lys. De var baseret på absorption af sollys ved hjælp af farvestoffer. Denne type solceller, der populært kaldes Grätzelsolceller efter kemikeren Michael Grätzel, som opdagede dem, består af et farvestof (lysabsorber), TiO_2 (halvleder), en elektrolyt og to elektroder. Grätzelceller er langt billigere at fremstille end siliciumbaserede solceller, men fordi det endnu ikke er lykkedes at fremstille Grätzelceller, der kan omdanne sollys til elektrisk energi ligeså ef-



Figur 3. Multilagssiliciumsolceller med flere halvlederovergange er i stand til at absorbere større mængder lys pr. arealenhed.

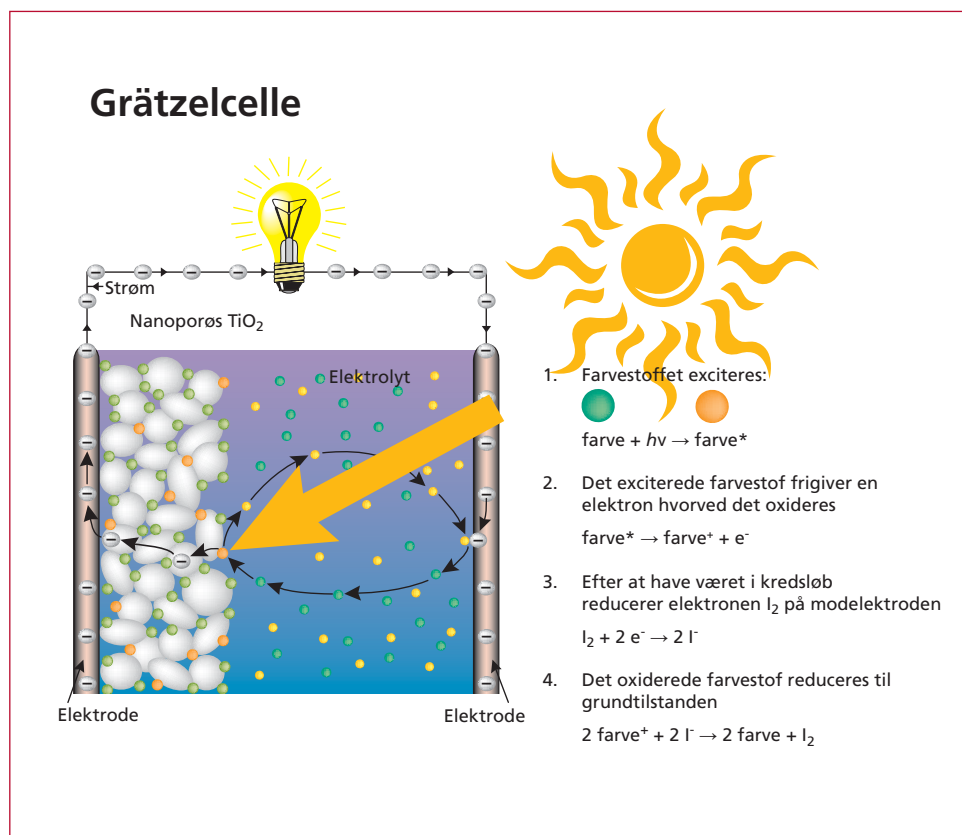
fektivt som siliciumsolceller, forskes der stadig aktivt på området. En skematisk illustration af hvordan en Grätzelcelle virker ses i figur 4.

Som det ses i figur 4 sker der i Grätzelcellen en serie af elektrokemiske redoxreaktioner. Først og fremmest absorberer et farvestof sollys og exciteres til en elektronisk anslået tilstand (reaktion 1). Det exciterede farvestofmolekyle reagerer derefter i en redoxkemisk proces,

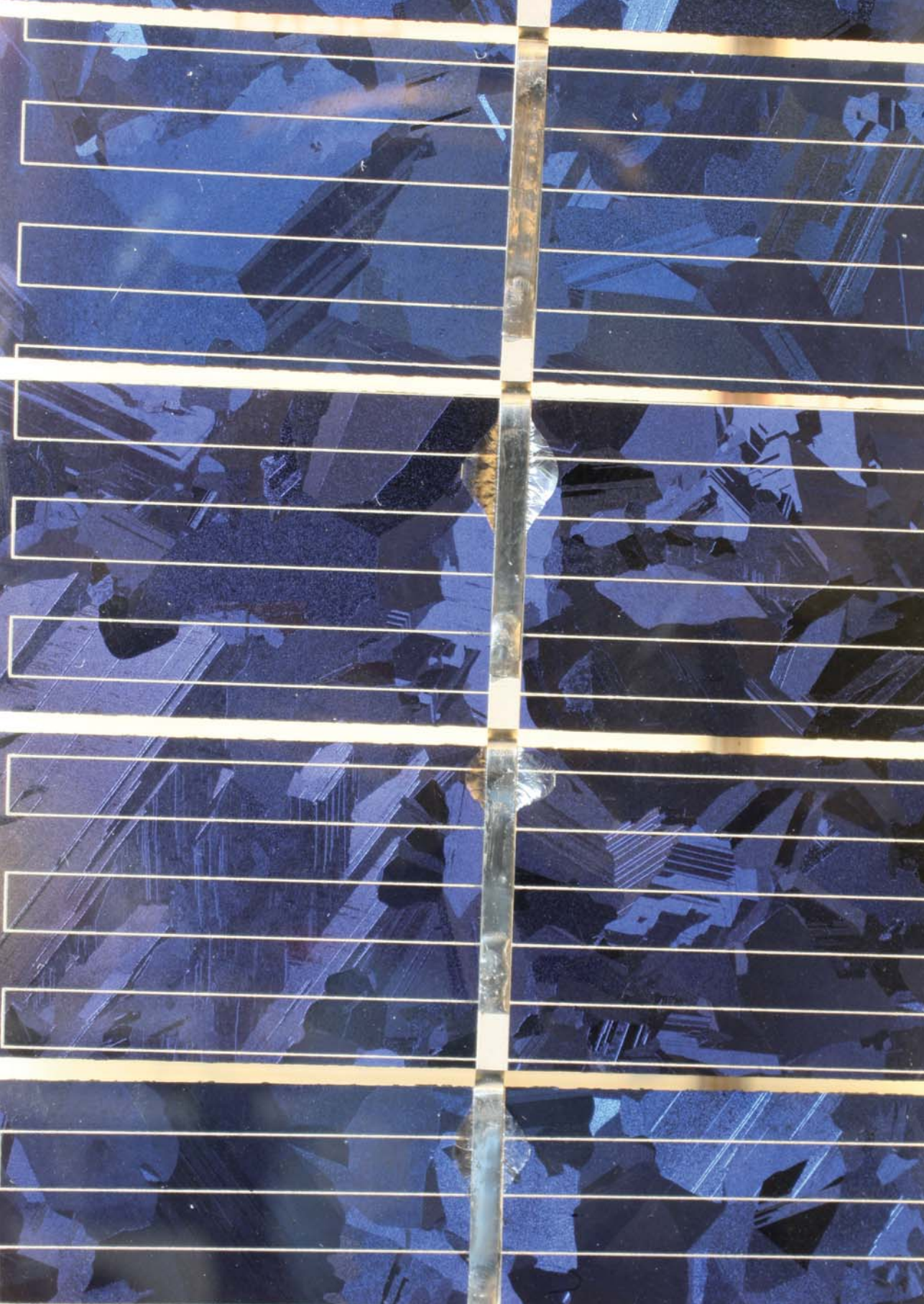
hvorved der dannes et elektron-hul par (reaktion 2). For at det dannede elektron-hul par skal kunne genere strøm og ikke bare ophæve sig selv, er det nødvendigt at elektron-hul parret splittes hurtigt, og at elektronen ledes væk fra farvestoffet ud i et kredsløb. Samlet set dækker reaktion 1 og reaktion 2 altså over en fotoionisering af farvestoffet (se box 2 om fotoelektrisk effekt). Ligesom i andre typer solceller ledes elektronen til den ene elektrode gennem et halvledende materiale, som i Grätzelceller typisk er TiO_2 . Samlet set er den ene elektrodeproces i en Grätzelcelle derfor fotooxidation af farvestoffet.

Ved Grätzelcellens anden elektrode foregår ligeledes en redoxkemisk proces, idet I_2 reduceres til I^- ioner (reaktion 3), hvorved elektronen ledes tilbage til systemet. I^- ionerne oxideres tilbage til I_2 i en redoxreaktion med farvestoffet (reaktion 4). På elegant vis sluttet det elektrokemiske kredsløb altså ved, at I_2/I^- redoxparret sørger for at reducere farvestoffet tilbage til grundtilstanden således, at det kan fotooxideres på ny.

Som beskrevet ved reaktionsskemaerne ovenfor er der to faktorer, der spiller ind, når man skal vurdere, hvorvidt et farvestof kan anvendes i en Grätzelcelle: Det skal kunne ab-



Figur 4. Skitse af Grätzelcelle. I figuren er de grå klumper til venstre TiO_2 nanopartikler, de små orange er exciterede farvestofmolekyler, de små gønne er farvestofmolekyler i grundtilstanden. I elektrolytopløsningen er de gule cirkler I_2 molekyler mens de grønne cirkler er I^- ioner.



sorbere synligt lys således, at det kan bringes i en elektronisk anslået tilstand, og det skal være i stand til at kunne indgå i redoxreaktioner. Heldigvis er der rigtig mange forskellige molekyler, der opfylder disse krav. Man kan derfor lave Grätzelceller med mange forskellige farvestoffer som det lysabsorberende materiale. Et typisk farvestof i en Grätzelcelle er en mere eller mindre eksotisk kompleksforbindelse bestående af en ruthenium metalion omgivet af bipyridinligander, men farvestoffet kan ligeså vel være et mere naturligt farvestof som f.eks. anthocyanin, der findes i brombærssaft (se figur 5).

Det største problem ved farvestof-baserede fotoelektrokemiske solceller er, at de fleste farvestoffer ikke er stabile i UV-lys i længere tid. Så med mindre man vil smøre sine solceller med solcreme, er man nødt til at arbejde på at finde bedre måder at skærme solcelle for UV-lys, eller finde farvestoffer der er mere stabile.

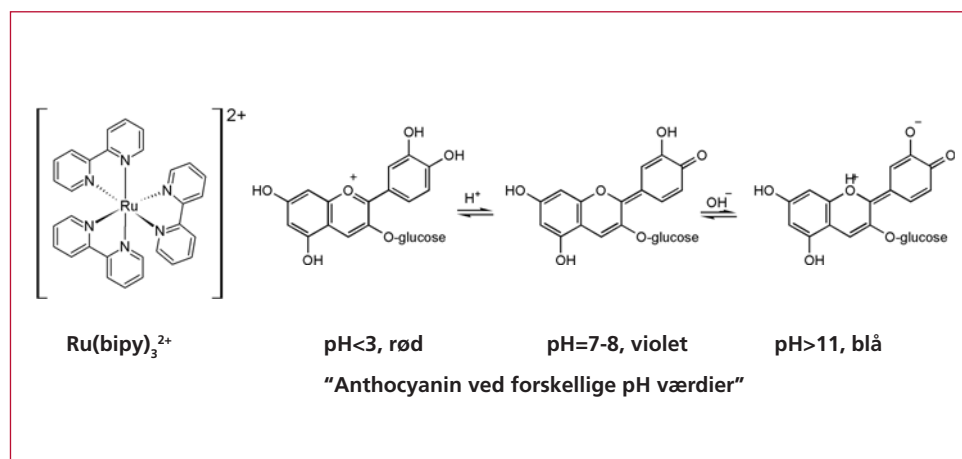
Fremtidens solceller

Forskning og udvikling inden for solceller er kommet langt siden 1883, hvor Fritts lavede den første solcelle med en effektivitet på om-

kring 1 % af sollyset energi. Der er naturligvis sket en række forbedringer, så effektiviteten er øget. Til trods for at solceller baseret på krystallisk silicium var nogle af de første effektive solceller, der blev fremstillet, er de fortsat blandt de bedste. Effektiviteten for de bedste siliciumsolceller ligger på omkring 35 %, selv om det i praksis hyppigt er noget lavere. Solcelletyper der bygger på denne teknologi, går derfor alle under betegnelsen førstegeneration solceller. Et af de store problemer ved disse er anskaffelsesprisen. Den aktive halvleder, oftest silicium, er relativt kostbar.

I forsøget på at fremstille billigere solceller er nye generationer af solceller under udvikling. Andengeneration solceller bygger på tynd-filmteknologien. Ideen bag dette er, at den aktive halvleder indbygges som en tynd film i et billigt substrat, som f.eks. glas eller keramik, og derved kun udgør en lille del af solcellen. Selv om prisen er lavere, er effektiviteten af denne type solceller også lavere ligesom holdbarheden ofte er begrænset.

Forskere er i gang med at udvikle nye typer af solceller, en tredjegeneration, der ikke bygger på de traditionelle halvledermaterialer, men i



Figur 5. "Typiske farvestoffer i Grätzelceller".

stedet inkluderer alt fra fotoelektrokemiske celler, ledende polymer solceller og nanokrystal solceller. Alle disse nye typer af solceller forsøger alle at konkurrere med de eksisterende solceller på fremstillingspris, effektivitet eller ved en speciel anvendelsesform. Hvorvidt

nogle af de eksisterende typer solceller bliver dominerende, eller en helt nye type opfindes, kan vi naturligvis ikke vide, men det er helt sikkert, at hvis vi skal løse vores energi- og miljømæssige udfordringer, må der fortsat forskes intensivt inden for området.

Forfattere



*Ph.d. studerende
Søren Kegnæs Klitgaard*



*Ph.d. studerende
Kresten Egeblad*



*Professor Claus
Hviid Christensen*