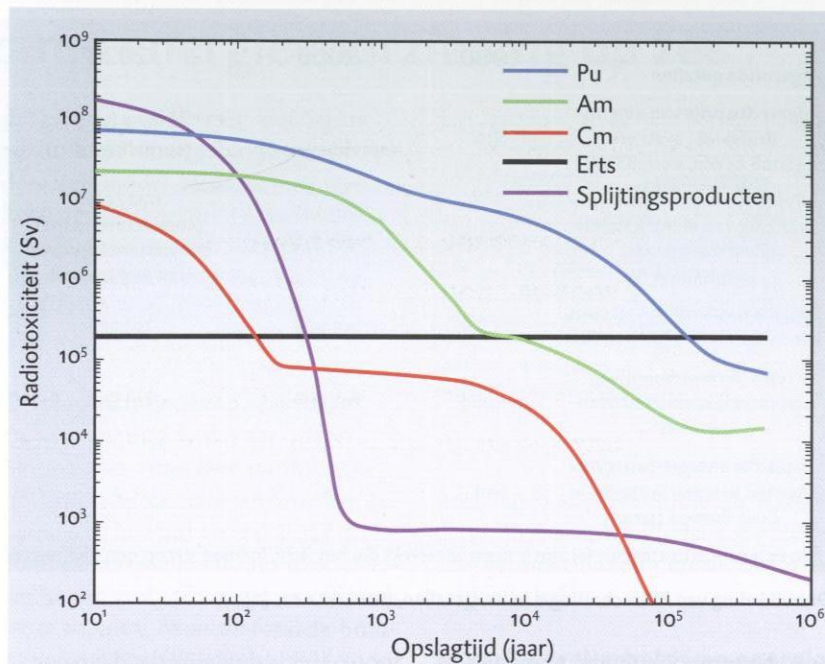


actoren operationeel, terwijl in andere landen, waaronder Nederland, wordt gewerkt aan verdere ontwikkeling en commercialisering van deze technologie.

### Beheersing van radioactief afval

Gebruikte splijtstof bevat naast resterend uranium ( $\approx 94\%$ ) en splijttingsproducten ( $4,5\%$ ), ook activeringsproducten als plutonium ( $\approx 1\%$ ) en hogere actiniden (totaal  $\approx 0,25\%$ ). In opwerkingsfabrieken wordt het uranium en plutonium afgescheiden en gereed gemaakt voor hergebruik. Het uranium bevat meer U-235 dan natuurlijk uranium ( $0,7\%$ ) en kan worden herverrijkt. Het plutonium bevat  $65\%$  splijtbare isotopen en kan met uranium worden bijgemengd en als splijtstof worden gebruikt. Het verglaasde kernafval bevat dan alleen de splijttingsproducten met een benodigde opslagtijd van 300 jaar en de hogere actiniden, waaronder americium met een benodigde opslagtijd van 5000 jaar. Voor een relatief kleine centrale als die in Borssele bedraagt deze afvalstroom minder dan 500 kg per jaar.

In de huidige generatie kerncentrales kan het plutonium slechts enkele malen worden gerecycleerd, waarna snelle reactoren nodig zijn om het restant te versplijten. In snelle reactoren worden neutronen niet afgeremd, maar blijft het neutronspectrum hoog-energetisch. Snelle reactoren en de



Radiotoxiciteit van de componenten in gebruikte splijtstof als functie van de tijd. De zwarte lijn is de radiotoxiciteit van het uraniumerts dat gedolven is om de splijtstof te fabriceren. Als plutonium en americium volledig worden gerecycleerd, blijft alleen de radiotoxiciteit van curium en de splijttingsproducten over met een benodigde opslagtijd van circa 500 jaar.

bijbehorende splijtstofcyclus zijn speerpunten in het onderzoek naar een duurzame ontwikkeling van kernenergie. Zo kan de benodigde opslagtijd van kernafval worden beperkt tot 5000 jaar. Als ook americium volledig zou worden gerecycleerd, wat theoretisch mogelijk is, zou de benodigde opslagtijd circa 500 jaar bedragen. Tevens kan dan tot wel 100 keer meer energie uit uranium worden gehaald.

Jan Leen Kloosterman (TU-Delft) doceert reactorfysica en verricht onderzoek aan geavanceerde kernreactoren met als doel de verduurzaming van de splijtstofcyclus.



## Fysica voor (net)pariteit – naar een sterke concurrentiepositie van zonnestroom

Fotovoltaïsche omzetting van zonne-energie (PV), ofwel zonnestroom, moet een grote rol gaan spelen, ook in Nederland. Zonnestroomsystemen zijn modulair, stil en onderhoudsarm en kunnen daarom in veel verschillende toepassingen worden gebruikt, van milliwatt tot gigawatt met dezelfde basisbouwstenen. Bekende voorbeelden zijn de autonome systemen voor plattelandsgedebieden in ontwikkelingslanden, geïntegreerde netgekoppelde systemen in de gebouwde omgeving van dichtbevolkte landen en zonnecentrales in zonnrijke gebieden. Een dak met zonnepanelen levert in Nederland jaarlijks een hoeveelheid elektriciteit die gelijk is

aan het gebruik van een huishouden. Bovendien houdt de stijging van de opbrengst per vierkante meter door constante innovaties het steeds maar groeiende elektriciteitsgebruik decennialang met gemak bij (tenzij we elektrisch gaan rijden en dat meetellen per huishouden).

### Netpariteit

De opwekkosten van zonnestroom dalen gestaag en zullen binnen tien jaar in grote delen van Europa (inclusief Nederland) het niveau van de consumentenpreizen van elektriciteit hebben bereikt (dit heet netpariteit) of zelfs daaronder zijn gekomen [2,3]. Die preizen liggen momenteel veelal tussen

0,20 en 0,25 €/kWh. Vanaf dat moment is het voor een particuliere eigenaar mogelijk om de investeringskosten voor een zonnestroomstelsel terug te verdienen uit de vermeden inkoop van elektriciteit en uit de verkoop van zonnestroom aan het net. Daar komt nog bij dat opwekkosten van zonnestroom vast zijn, terwijl de kosten van stroom uit het net waarschijnlijk verder zullen stijgen. Uiteraard staat of valt het terugverdienen van de investering met de mogelijkheid om 'netto verrekening' toe te passen. In populaire, maar technisch wat achterhaalde termen spreekt men dan van een 'terugdraaiende meter'. Voor het bereiken van netpariteit zijn geen doorbraken

Afgeronde getallen	1980	2000	2020	2030	langetermijn- potenteel
Typische prijs van een bedrijfsklaar systeem (2008 €/Wp, excl. BTW)	>30	5 (spreiding 4~8)	2,0 (spreiding 1,5~3)	<1	0,5
Typische kosten voor opwekking van elektriciteit in Zuid-Europa/NL (2008 €/kWh)	>2 / >3	0,30 / 0,50	0,12 / 0,20 (concurrerend met consumentenprijzen van elektriciteit)	0,06 / 0,10 (concurrerend met groothandelsprijzen van elektriciteit)	0,03 / 0,05
Typisch rendement van commerciële vlakkeplaatpanelen	tot 8%	tot 15%	tot 20%	tot 25%	tot 40%
Typisch rendement van commerciële concentratorpanelen*	(~10%)	tot 25%	tot 30%	tot 40%	tot 60%
Typische energie-terugverdientijd van een systeem in Zuid-Europa (jaren)	>10	2	1	0,5	0,25

\* In een concentratorpaneel zijn lenzen verwerkt die het licht focuseren op een kleine zonnecel die in het brandpunt is gemonteerd.

Ontwikkeling van PV-technologie in kengetallen, bewerkt naar [2].

(wat die term ook moge inhouden) of volledig nieuwe technologieën nodig, maar 'slechts' sterk verbeterde versies van bestaande technologieën en grootschalige productie en installatie. Onderzoek en ontwikkeling zijn daarbij absoluut noodzakelijk.

Hoewel het bereiken van netpariteit algemeen wordt gezien als een belangrijke mijlpaal is het nog lang niet voldoende voor zeer grootschalige inzet van zonnestroom. We moeten dan denken aan vele terawatts-piek (TWp), ofwel vele tienduizenden vierkante kilometers aan zonnestroomsystemen. Op de lange termijn zou het zelfs kunnen gaan om een miljoen vierkante kilometer.

### Onderzoek naar kostenverlaging

Het is niet te voorspellen hoe goedkoop zonnestroom zou moeten zijn om in de volle breedte te kunnen concurreren met andere opties voor elektriciteitsopwekking. Dat hangt onder meer af van de ontwikkeling van de prijzen van fossiele brandstoffen, maar ook van de 'internalisatie' van maatschappelijke kosten in de prijzen van energie. Men kan bijvoorbeeld denken aan de kosten van CO<sub>2</sub>-opslag. Met een paar slagen om de arm zouden de kosten van zonnestroom echter toch zeker lager moeten zijn dan 0,10 €/kWh en liefst in de buurt van 0,05 €/kWh moeten komen (aanzienlijk lager dan de kosten die nodig zijn voor netpariteit op het niveau van consumentenprijzen). Dat betekent voor zonnige landen ruwweg een daling met een factor 3 tot 6 en voor ons land een factor 5

tot 10. Het is duidelijk dat daarvoor aanzienlijk meer nodig is dan verbeterde versies van bestaande technologieën. Bovendien moeten niet alleen de prijzen van zonnepanelen sterk omlaag, maar ook die van de rest van het systeem, de zogenaamde Balance-of-System (BoS). Vertaald naar concrete uitdagingen betekent dit een drastische verhoging van het rendement van cellen, panelen en systemen, ontwikkeling van methoden voor zeer snelle fabricage en efficiënte installatie en vermindering van het materiaalgebruik en/of toepassing van goedkope(re) materialen. Dit alles met behoud of verlenging van de levensduur van alle systeemcomponenten. Fysisch onderzoek kan en moet een rol spelen bij alle aspecten. De combinatie van een grote wetenschappelijke uitdaging met overdui-

Wim C. Sinke (ECN Petten en Universiteit Utrecht) doceert en doet onderzoek op het gebied van halfgeleiders, zonnecellen en duurzame-energiesystemen. Hij is onder meer Executive Committee member van het EU PV Technology Platform.



delijke maatschappelijke relevantie maakt zonnestroom een heel aantrekkelijk thema. Het is niet voor niets dat President Obama en zijn Minister van Energie Nobelprijswinnaar Steve Chu onderzoek aan duurzame energie in de top-drie van prioriteitsgebieden hebben gezet.



Een dak met zonnepanelen levert gemiddeld per jaar genoeg elektriciteit voor een huishouden (foto: Mayersloot, Broek op Langedijk. Architect: Tjerk Reijenga).



verkeren nog in de onderzoeks- en ontwikkelingsfase, maar windenergie is klaar voor grootschalige realisatie, hoewel er nog veel te leren en organiseren is. Nu worden bijvoorbeeld omgebouwde landturbines geschikt gemaakt voor offshore toepassingen. In de toekomst zullen onderhoudsarme *dedicated* offshoreturbines worden ingezet, die bijvoorbeeld gebruik maken van permanente magneten (*direct-drive*). Die toekomst wordt overigens nu al gerealiseerd [5].



### Proactief overheidsbeleid

Maar misschien wel de belangrijkste uitdaging ligt bij de samenleving en de overheid. Er is een constructieve en meer proactieve houding van de overheid noodzakelijk, die daarvoor uiteraard het mandaat van de samenleving nodig heeft. De POSEIDON-visie wordt ondersteund door het Wereld Natuur Fonds en de Stichting Natuur en Milieu.

De volgende elementen zouden onder andere deel moeten uitmaken van dit proactieve beleid:

- Ontwikkel een langetermijnvisie

voor de rol van de Noordzee in de Europese energievoorziening (zoals in de POSEIDON-visie): duurzame energie, fossiele energiedragers en CO<sub>2</sub>-opslag.

- Stem het Nederlandse beleid met de andere Noordzeelanden af.
- Participeer als overheid in offshore duurzame energieprojecten, reduceer daarmee de kosten, en stel de duurzame energiebaten van de toekomst veilig voor de maatschappij als geheel.
- Help bij het opbouwen van de industriële keten die nodig is om van

offshore energie een succes te maken.

### Referenties

- 1 *The Nuclear Power Revolution: Modular High Temperature Reactors*, [www.21stcenturysciencetech.com](http://www.21stcenturysciencetech.com)
- 2 *A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, ISBN 978-92-79-05523-2 (European Communities, 2007), see also [www.eupvplatform.org](http://www.eupvplatform.org).
- 3 W.C. Sinke, *Grid parity: Holy Grail or hype? Photovoltaic solar electricity on its way to competitiveness*, *European Sustainable Energy Review*, in press.
- 4 [www.poseidonenergy.com](http://www.poseidonenergy.com)
- 5 [www.darwind.nl](http://www.darwind.nl)

## URL van de maand



### Proefjes voor kinderen

Proefjes.nl: een erg leuke website voor kinderen vanaf acht jaar waarbij het doel is kinderen kennis te laten maken met natuurkunde, scheikunde en biologie. Er zijn meer dan 100 proefjes die je kunt doen waarvan zo'n 70 op het gebied van de natuurkunde. Ze zijn stap voor stap uitgeschreven en maken gebruik van eenvoudige materialen. Bij ieder proefje zijn er kant-en-klare werkbladen waarop de kinderen vragen kunnen invullen om uit te printen. Voor docenten zijn er handleidingen met suggesties voor lessen met een circuit van proefjes in de klas. De proefjes gaan over lucht, water, licht, elektriciteit, geluid en vuur. Zo zijn er over licht onderwerpen zoals 'camera maken', 'gebroken lichtstraal', 'kleuren van de regenboog', 'spooktulp' en 'zien in het donker'. De proefjes zijn niet altijd even exact van karakter want er is er ook een die 'poep maken' heet.

In 2004 startte een projectgroep op initiatief van Robbert Dijkgraaf deze website. De proefjes zijn in elkaar gezet door Arno Verweij, Fleur Zeldenrust en José van Gelderen. Tijn Snoodijk maakte de tekeningen en verzorgde de vormgeving. In 2005 ging de projectgroep verder als Stichting Proefjes.

Nieuw is een projectgroep met enkele studenten (van de UvA en de HvA) die de proefjes meer beeldend en minder tekstueel maakt voor groep 3 en 4. Andere activiteiten zijn de duostages die in februari weer van start zijn gegaan. Hierbij werken een pabo-student en een student met een exacte studierichting samen aan het uitwerken van proefjes. En of dat niet genoeg is: er worden ook workshops gegeven aan pabo-studenten en basisschooldocenten (kijk bijvoorbeeld maar eens op [www.pixs.nl/proefjes](http://www.pixs.nl/proefjes) of op [www.stichtingproefjes.nl/workshops.php](http://www.stichtingproefjes.nl/workshops.php)). Tenslotte wordt er maandelijks een nieuwsbrief verstuurd met nieuws over proefjes en lesmateriaal van proefjes.nl. Je kunt je aanmelden via [nieuwsbrief@proefjes.nl](mailto:nieuwsbrief@proefjes.nl).

Lo Bour

