

SOLAR ENERGY FOR CLIMATE IMPACT
CHALLENGES AND OPPORTUNITIES OF ULTRA LARGE SCALE PHOTOVOLTAICS

Wim Sinke, TNO and University of Amsterdam

TU Delft Urban Energy Institute - 8 December 2021

› **THE STORYLINE**

SOLAR ENERGY: A SUCCESS STORY THAT IS ONLY BEGINNING

› **Developments so far:**

- › Our view on solar photovoltaics (PV);
- › Markets and costs;
- › Technology and applications.

› **What is (still) to be done? To solar energy 2.0:**

- › From global niche to impact;
- › From electricity to energy;
- › From low cost to high value;
- › From renewable to sustainable;
- › From dependency to PV (also) made in Europe.

› **What is standing in the way? Remaining myths and barriers**

› **The developments in bird's eye view**

› **THE STORYLINE**

SOLAR ENERGY: A SUCCESS STORY THAT IS ONLY BEGINNING

› **Developments so far:**

- › Our view on solar photovoltaics (PV);
- › Markets and costs;
- › Technology and applications.

› **What is (still) to be done? To solar energy 2.0:**

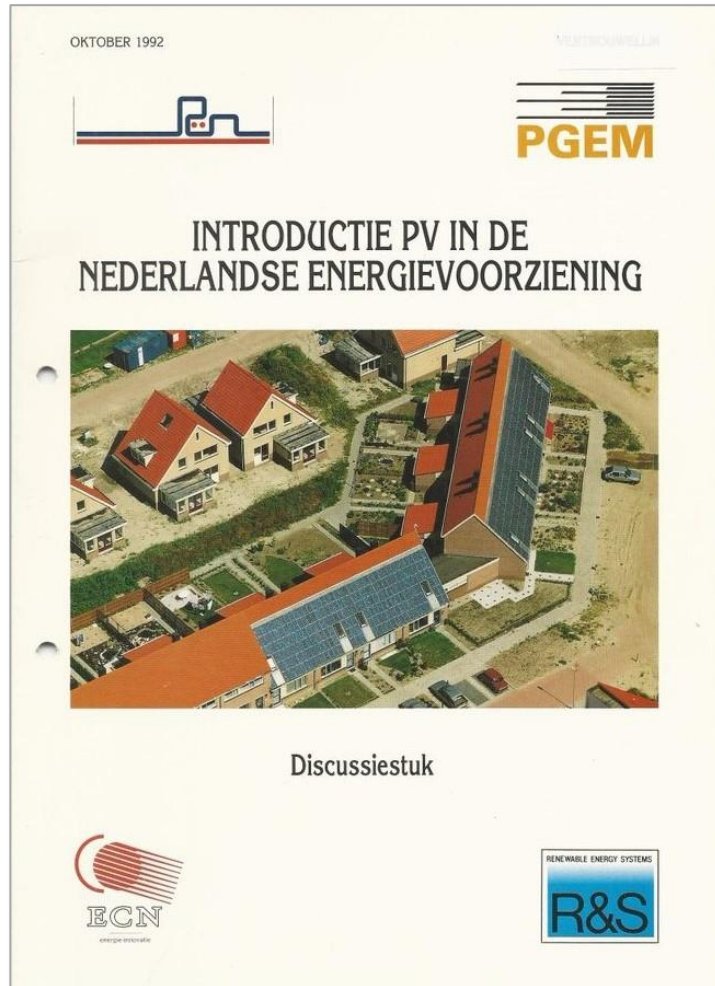
- › From global niche to impact;
- › From electricity to energy;
- › From low cost to high value;
- › From renewable to sustainable;
- › From dependency to PV (also) made in Europe.

› **What is standing in the way? Remaining myths and barriers**

› **The developments in bird's eye view**

DEVELOPMENTS SO FAR

OUR VIEW ON SOLAR PV



1992

Forget King Coal. Solar Is 'New King' of Global Power Markets, Says IEA

The global energy watchdog continues to upgrade its renewables outlook but warns that grid upgrades and coal closures must follow.

JOHN PARNELL | OCTOBER 13, 2020



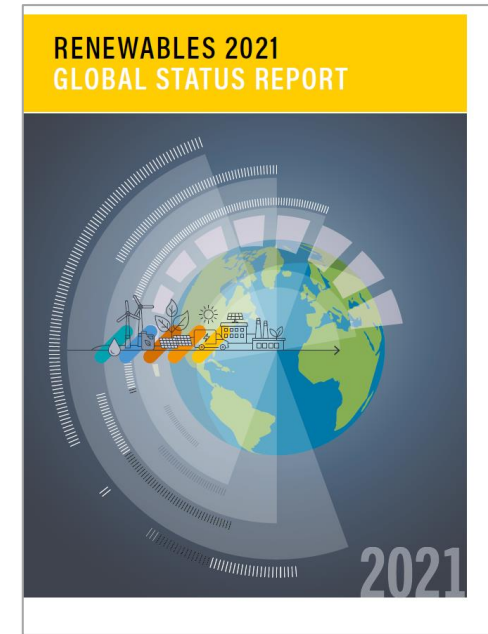
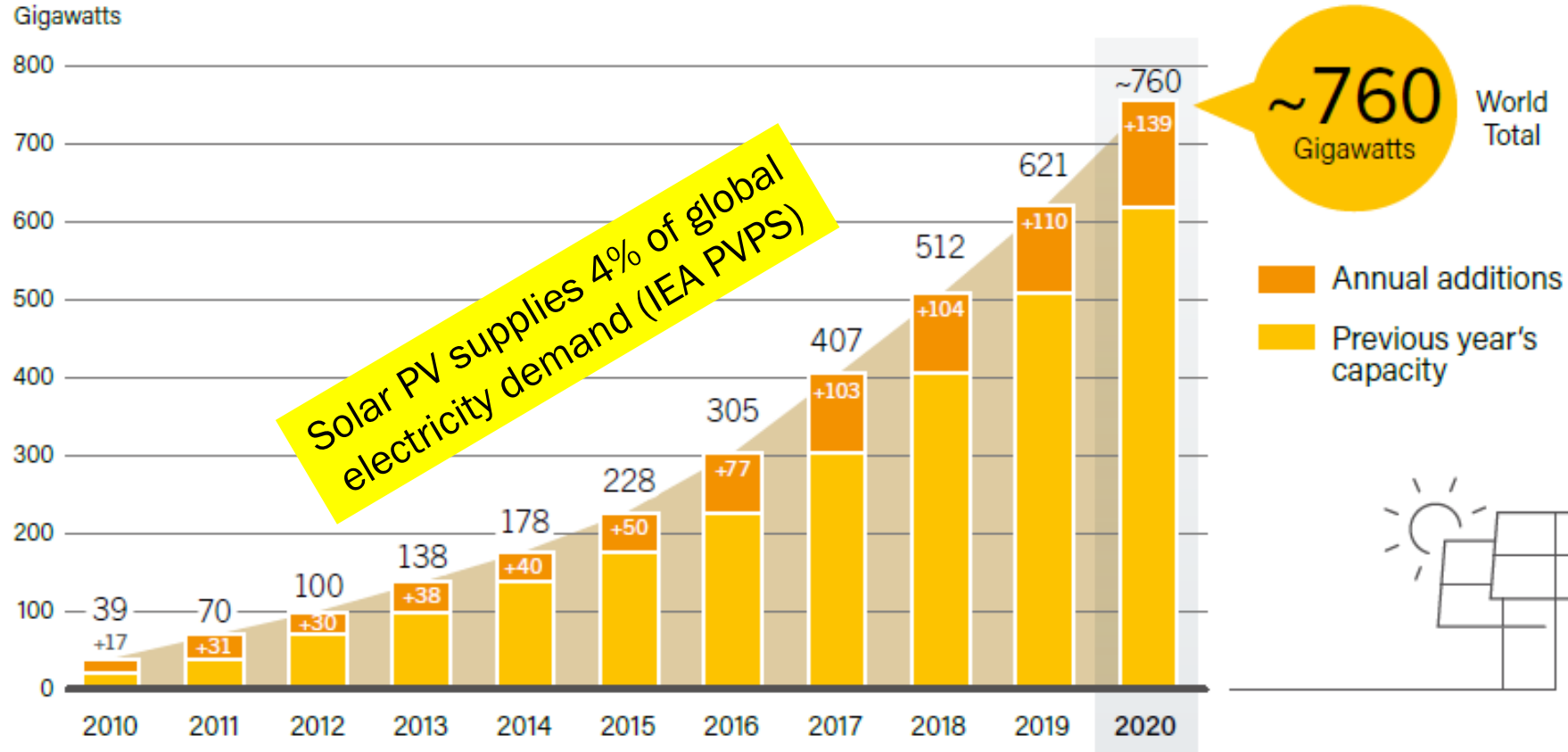
Solar is set for a decade of dominance but weak grid investment could undermine it, the IEA has warned.

Solar power is the "new king" of global electricity markets, with the International Energy Agency calling it the cheapest form of electricity in history in its annual centerpiece [World Energy Outlook](#) report.

2020

DEVELOPMENTS SO FAR

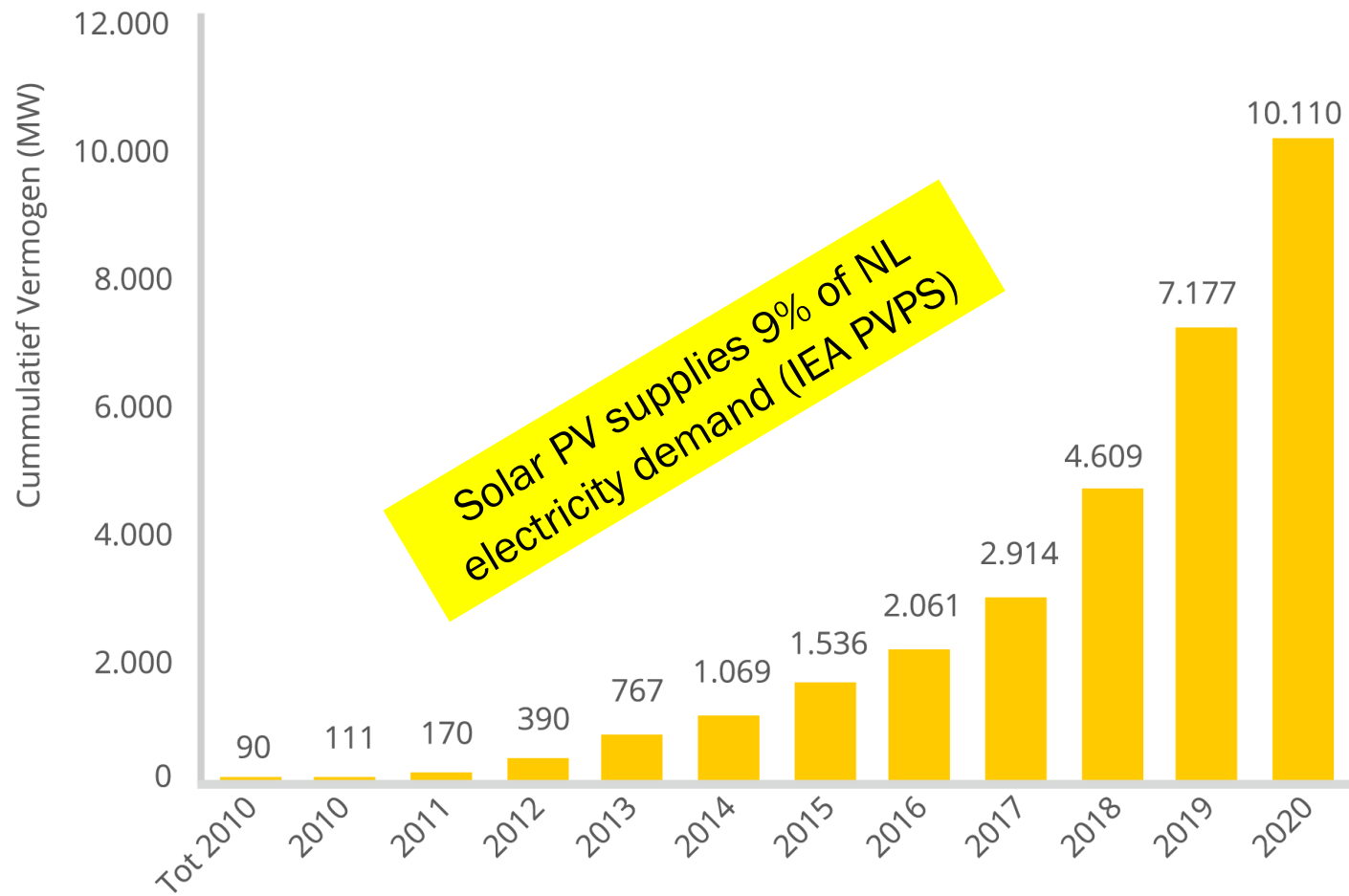
MARKET – GLOBAL (GROWTH 35%/YR)



<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>

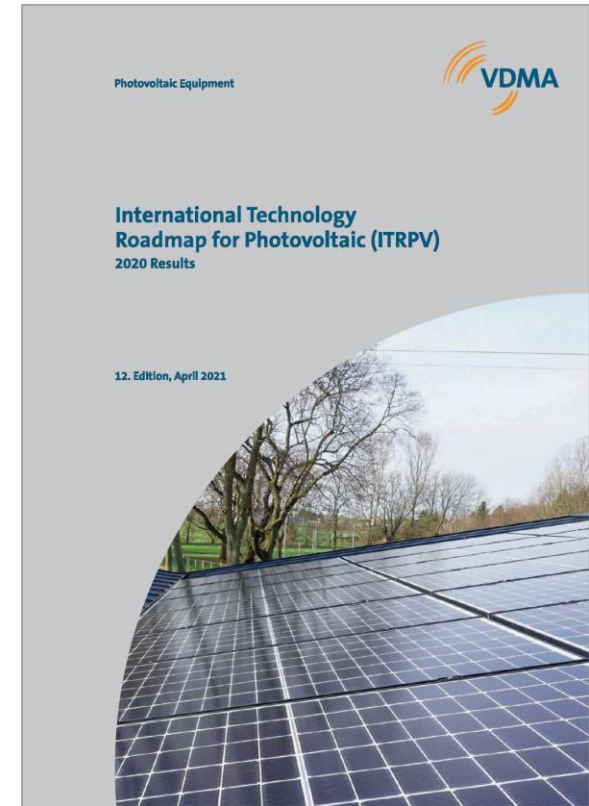
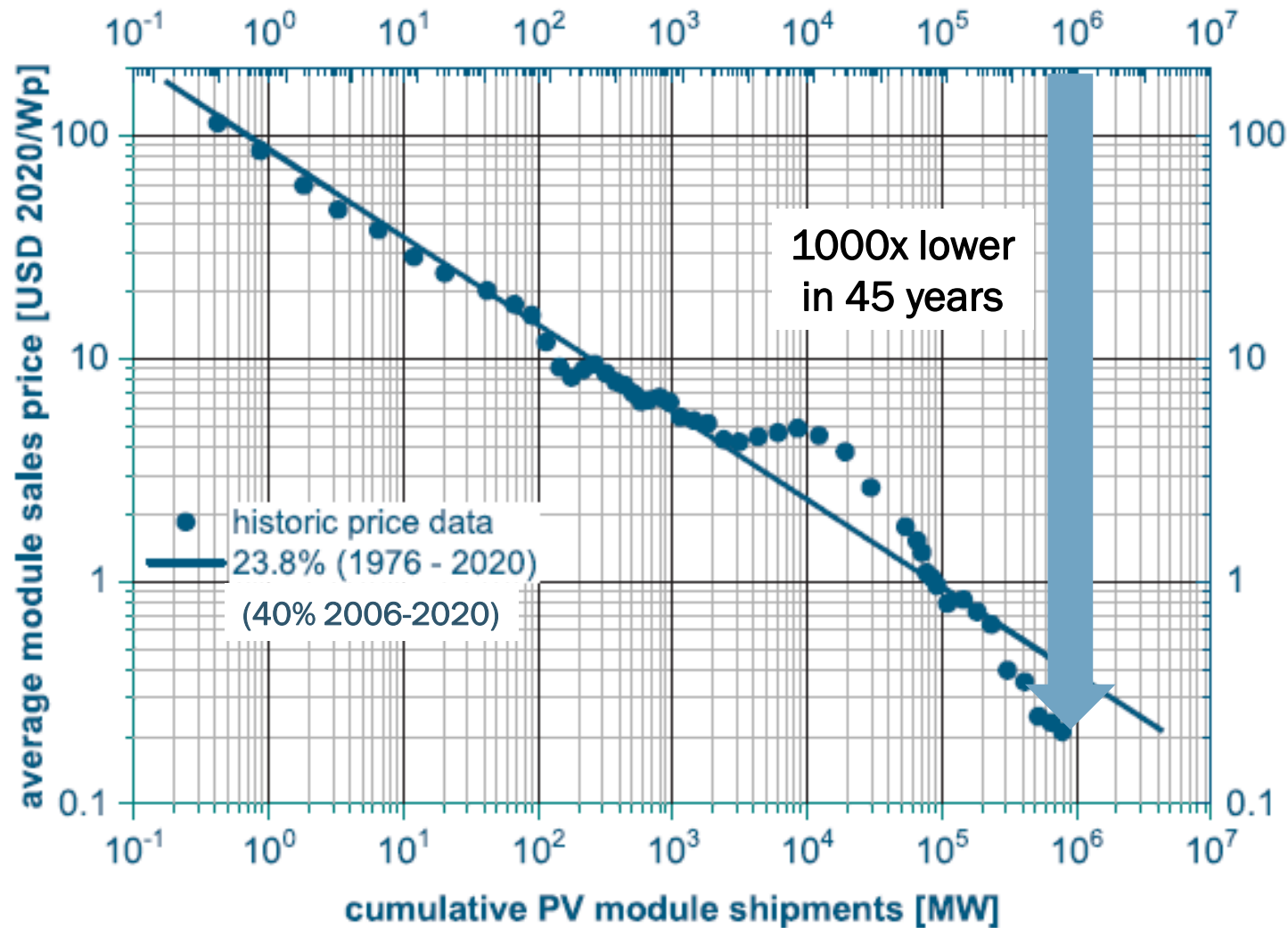
DEVELOPMENTS SO FAR

MARKET - NETHERLANDS (GROWTH >50%/YR)



DEVELOPMENTS SO FAR

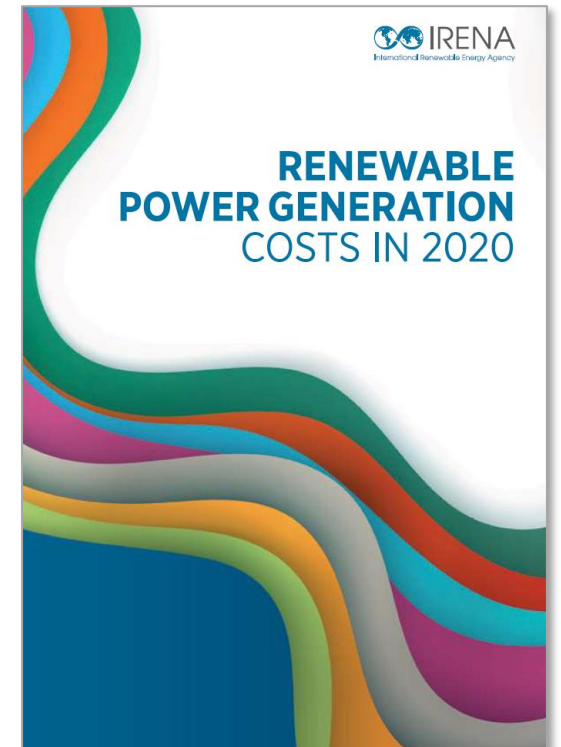
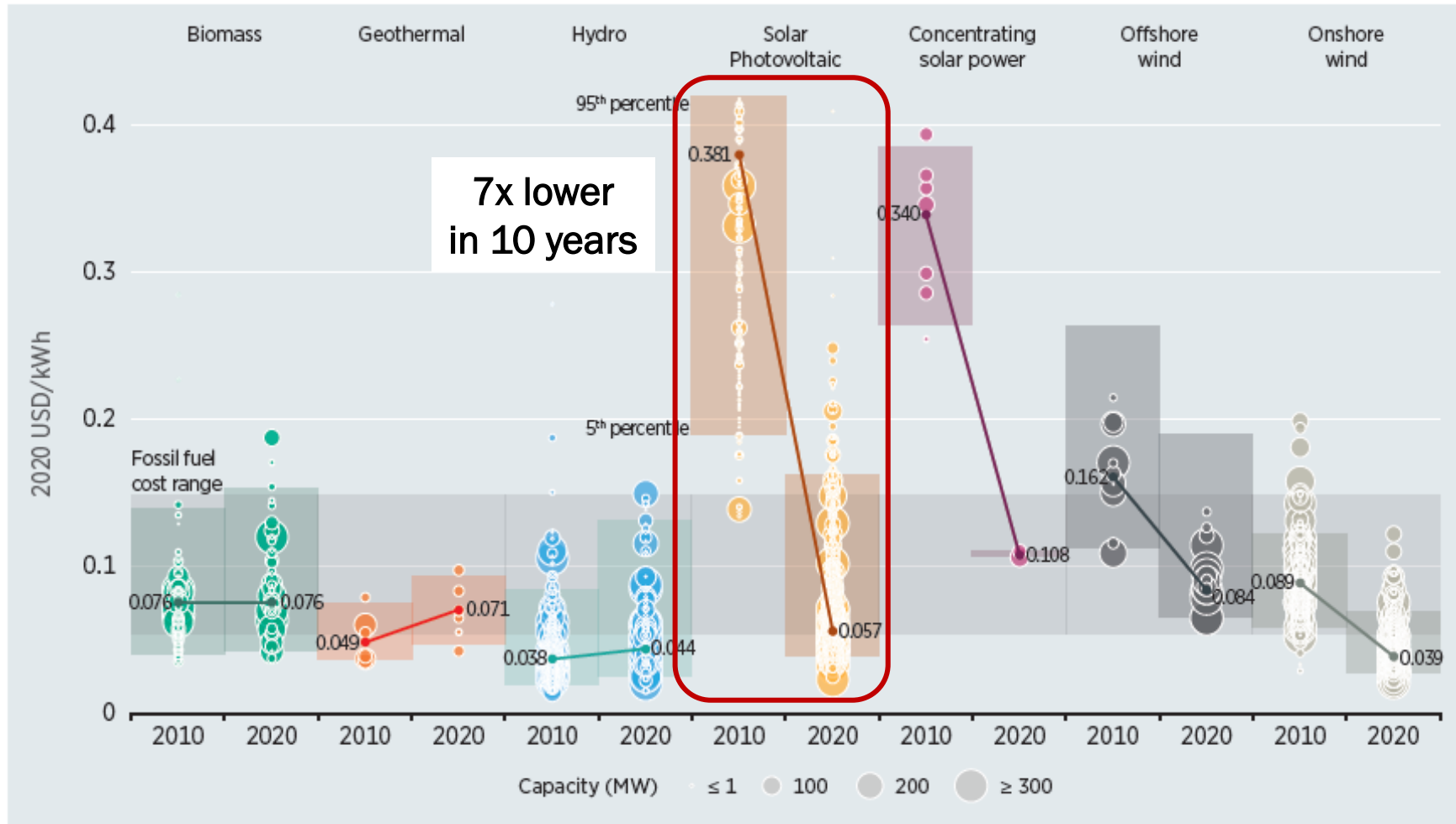
MODULE PRICE



<https://itrpv.vdma.org/download>

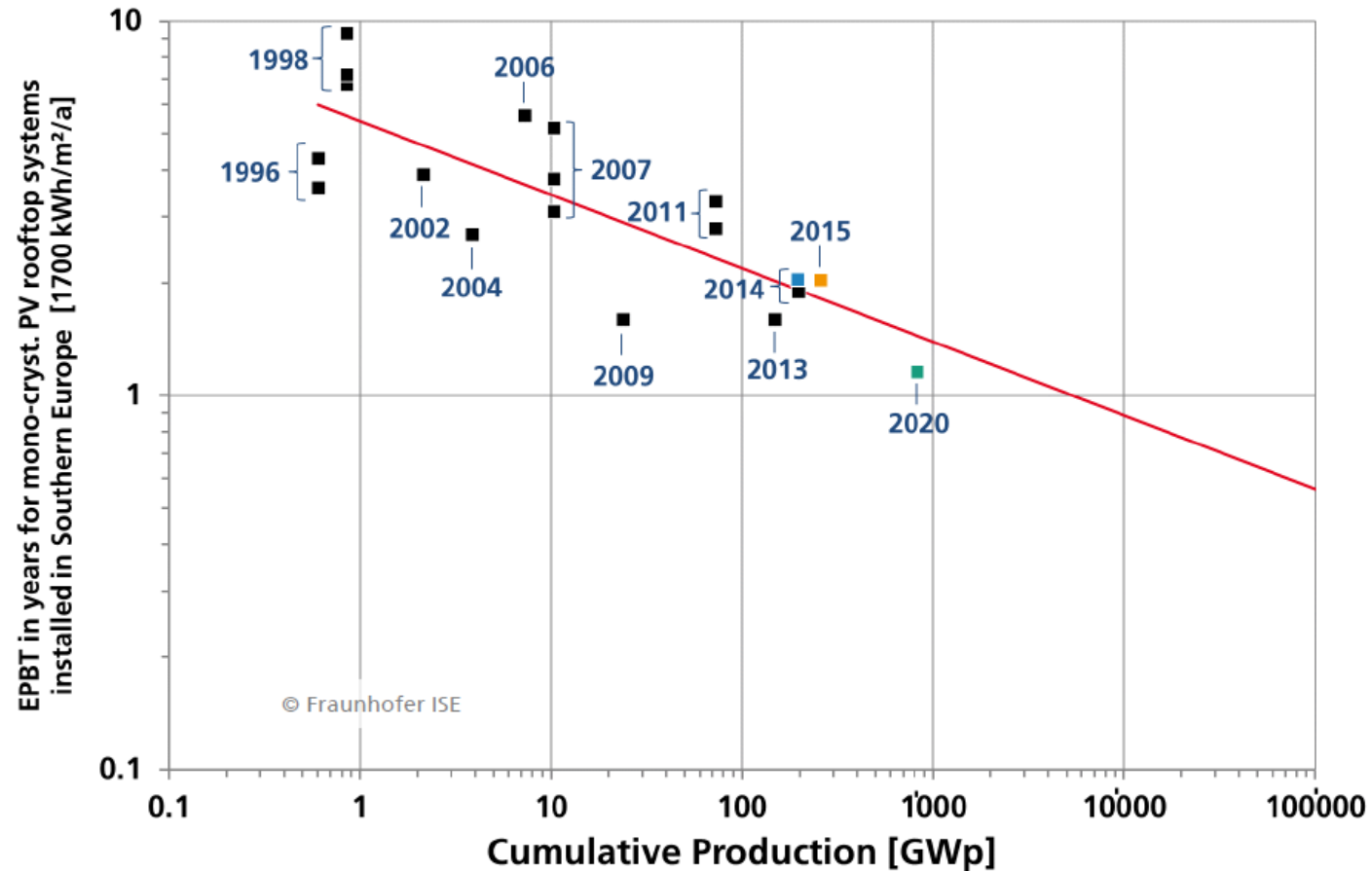
DEVELOPMENTS SO FAR

GENERATION COSTS (LCOE) LARGE SYSTEMS




DEVELOPMENTS SO FAR

ENERGY PAY-BACK TIME ROOFTOP SYSTEMS



Irradiation: 1700 kWh/m²/a at an optimized tilt angle; **Years:** Estimated average year of original data

PHOTOVOLTAICS REPORT




Prepared by

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE
with support of PSE Projects GmbH

Freiburg, 27 July 2021
www.ise.fraunhofer.de

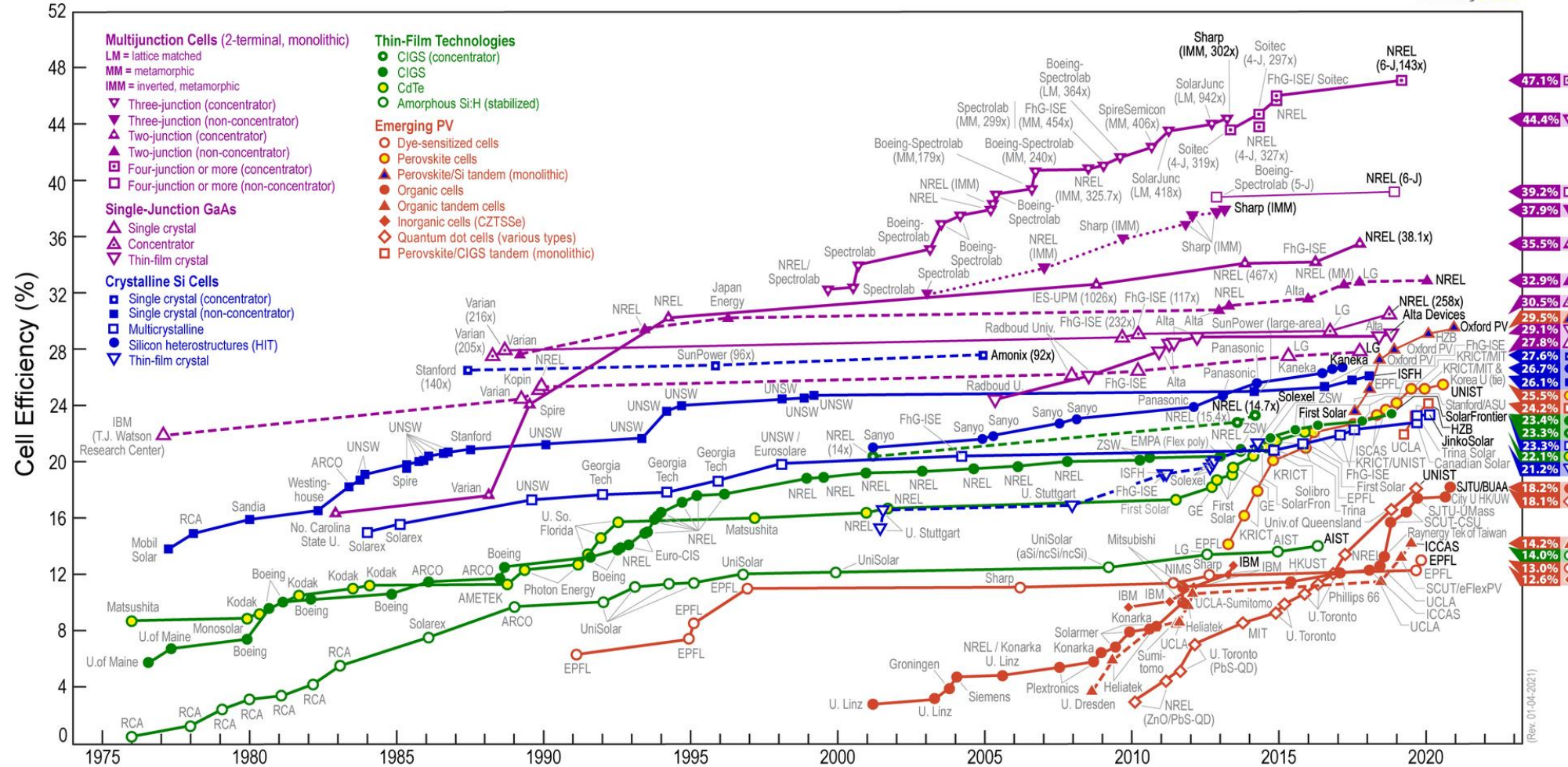
© Fraunhofer ISE
PHG-SE, ISE-PUBLIC



DEVELOPMENTS SO FAR

RECORD EFFICIENCY OF LABORATORY CELLS

Best Research-Cell Efficiencies

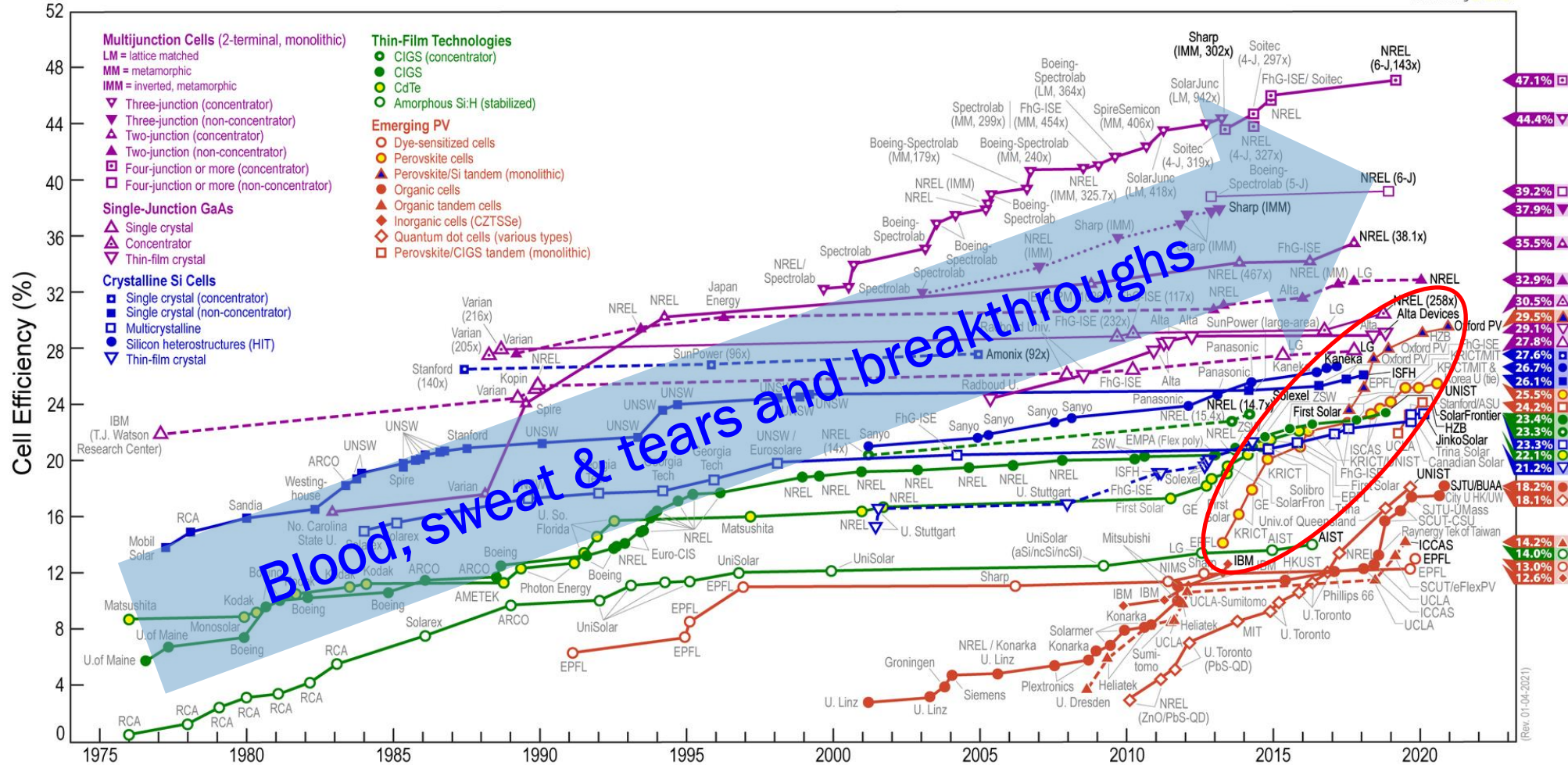


<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

DEVELOPMENTS SO FAR

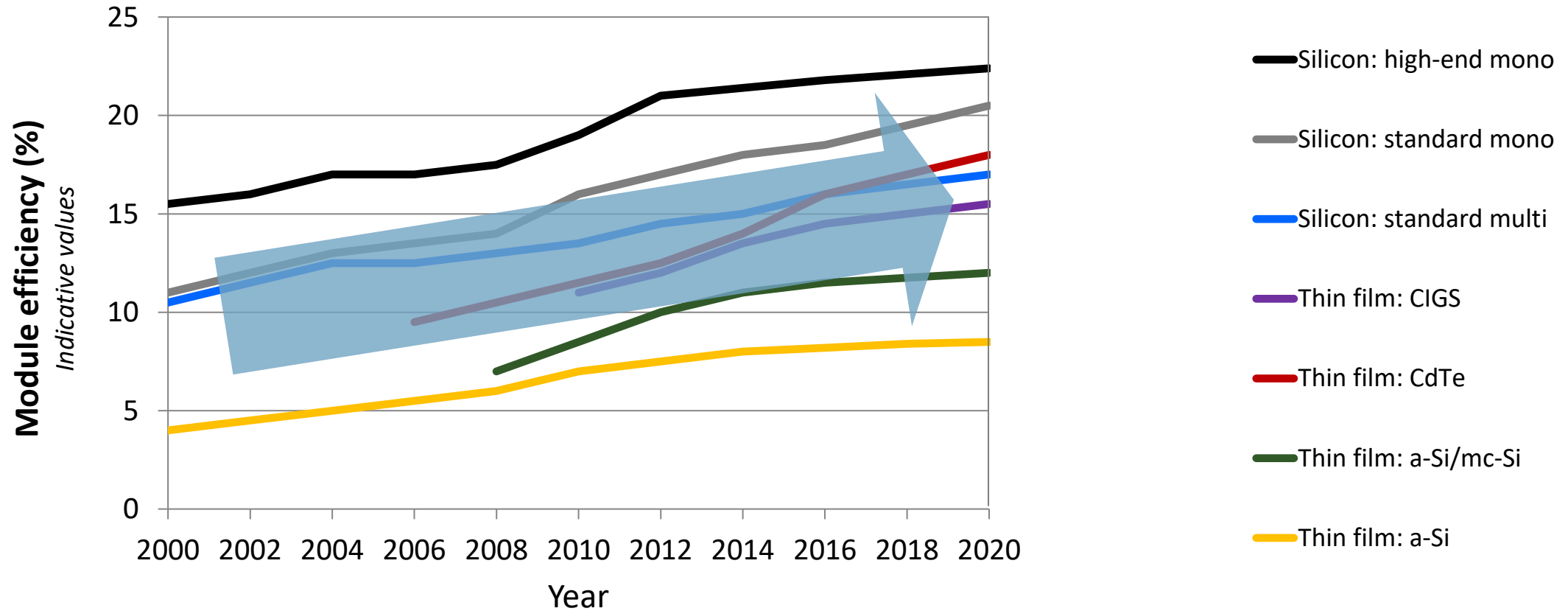
RECORD EFFICIENCY OF LABORATORY CELLS

Best Research-Cell Efficiencies



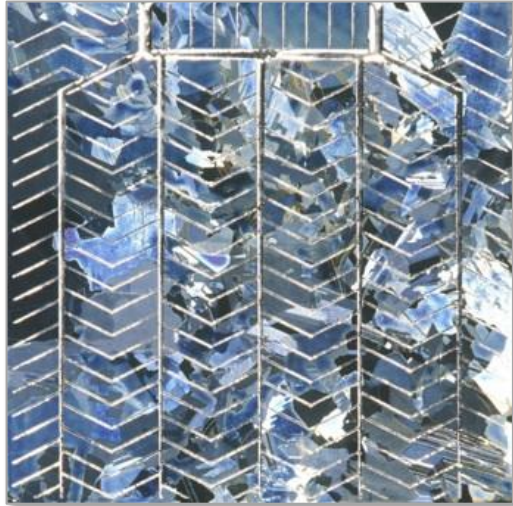
DEVELOPMENTS SO FAR

EFFICIENCY COMMERCIAL SOLAR MODULES

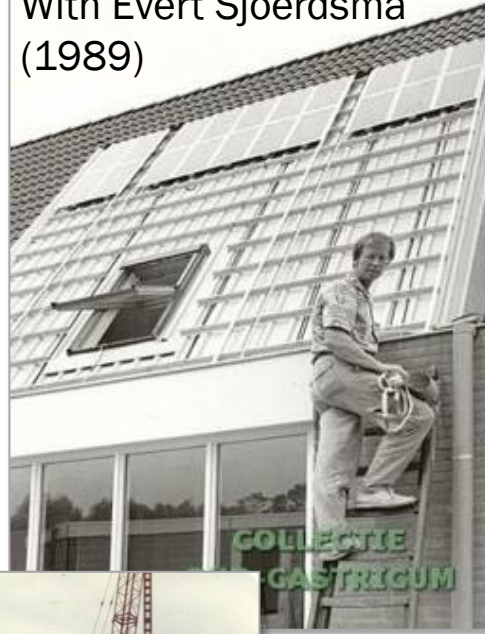


DEVELOPMENTS SO FAR TECHNOLOGY

Heijmans/AERspire



Solar house Castricum
With Evert Sjoerdsma
(1989)



Efficiency
up to >20%



Solar foils on a floating
system (project Solar@Sea)

3D-shaped system with
high-efficiency silicon cells
(4,5 m²) on Lightyear One



Efficiency
10%



1981

2021

DEVELOPMENTS SO FAR APPLICATIONS



First grid-connected system in NL, ECN, Petten, 1989



City of the Sun, Heerhugowaard, 2020

› **THE STORYLINE**

SOLAR ENERGY: A SUCCESS STORY THAT IS ONLY BEGINNING

› **Developments so far:**

- › Our view on solar photovoltaics (PV);
- › Markets and costs;
- › Technology and applications.

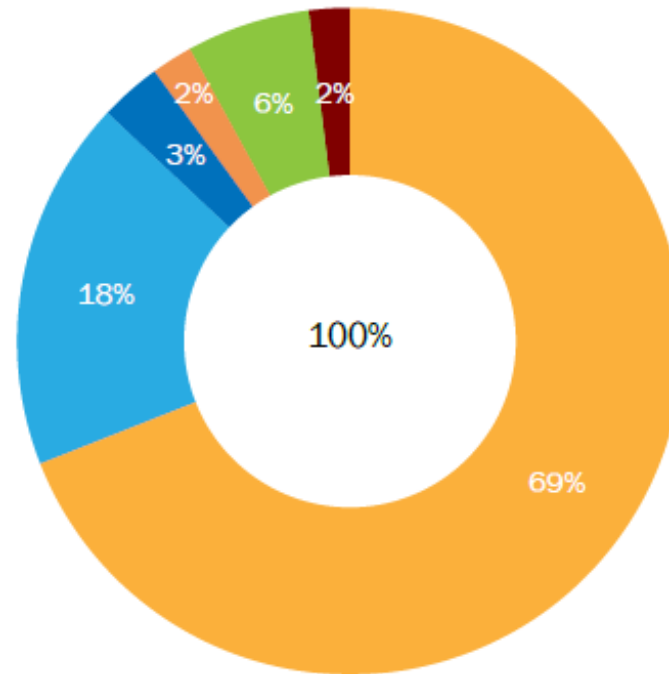
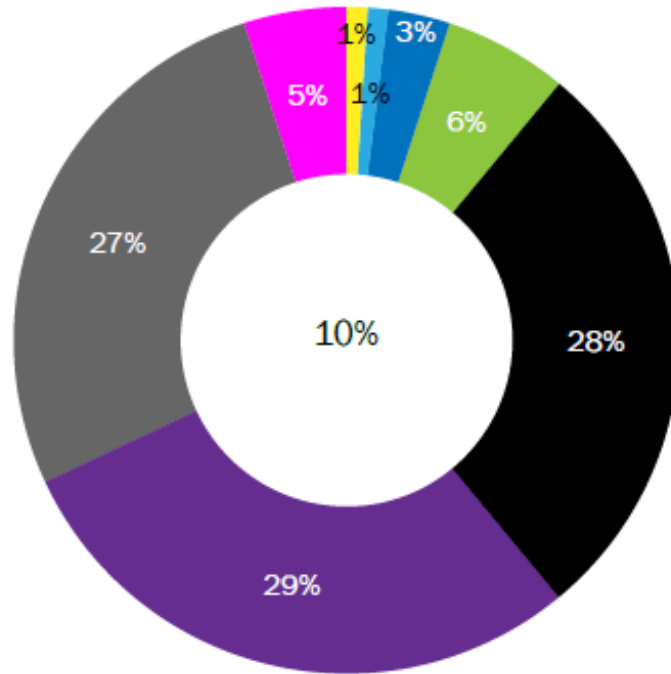
› **What is (still) to be done? To solar energy 2.0:**

- › From global niche to impact;
- › From electricity to energy;
- › From low cost to high value;
- › From renewable to sustainable;
- › From dependency to PV (also) made in Europe.

› **What is standing in the way? Remaining myths and barriers**

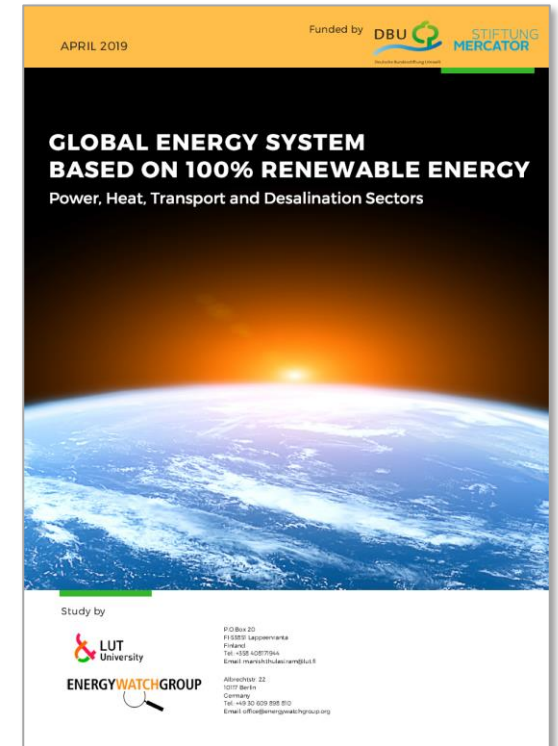
› **The developments in bird's eye view**

WHAT IS (STILL) TO BE DONE? FROM NICHE TO GLOBAL IMPACT



- Solar PV
- Wind energy
- Hydropower
- Geothermal
- Biomass / Waste
- Fossil coal
- Fossil oil
- Fossil gas
- Nuclear
- Others

Contributions to total global primary energy demand
(2050: 60 terawatt-peak solar PV)



<http://energywatchgroup.org/new-study-global-energy-system-based-100-renewable-energy>

WHAT IS (STILL) TO BE DONE? FROM ELECTRICITY TO ENERGY



International Renewable Energy Agency

ABOUT ▾ OUR WORK ▾ RENEWABLES ▾ NEWSROOM


Deep Electrification Powered by Renewables Key for a Climate-Safe Future

09 April 2019 | Press Release



New report by IRENA charts pathways to further accelerate energy transformation which meets climate objectives while creating jobs and fostering economic growth

2019



Elektrificatie: cruciaal voor een duurzame industrie

Routekaart Elektrificatie in de Industrie

Routekaart Elektrificatie

op weg naar een duurzame industrie in 2050

De Nederlandse industrie draait van oudsher op een combinatie van aardgas en grote hoeveelheden restgasen. Om de industrie te verduurzamen en de CO2-uitstoot volgens de doelstellingen van het Klimaatakkoord terug te brengen, zijn twee stappen nodig. Stappen die het huidige systeem in 30 jaar tijd moeten transformeren tot een nieuwe way of working. Dit van de optie met grote impact is elektrificatie van de industrie. De Routekaart Elektrificatie heeft tot in detail berekend en uitgetippeld wat de meest kansrijke route is tot 2030 en 2050.

80-130 TWh
ENERGIEBEHOEFTE om de Nederlandse industrie in 2050 gestroomde op de elektrische energie te laten draaien

60%
MINIMAAL VAN DE TOTAAL BEHOEFTE van de industrie bestaat uit elektrificatie in 2050

3 - 4 x
MEER ELEKTRICITEIT heeft de industrie in 2050 nodig dan haar huidige elektriciteitsvraag

26 - 46 GW
EXTRA UIT WIND OP ZEE is nodig om aan de grotere elektriciteitsvraag te kunnen voldoen

TOT 2030 AAN DE SLAG
met a-bollers, elektrische aandrijvingen, warmtepompen en innovaties die nu 2030 nodig zijn

Van oudsher: aardgas en restgasen

Noodzaak: in 30 jaar tijd transformatie om industrie te verduurzamen

Optie: elektrificatie van de industrie

Routekaart Elektrificatie: kansrijke route naar 2030 en 2050

"Het technisch potentieel voor industriële elektrificatie in Nederland is hoog"

Stappenplan

- Stel heldere beleidsdoelen en maak de instrumenten passend voor industriële elektrificatie.
- Ontwikkel opwek en flexibiliteit, in samenhang met de industriële vraag.
- Versnel de opschaling van de transportinfrastructuur.
- Ontwikkel een programmatische aanpak van innovaties en kennisverspreiding.

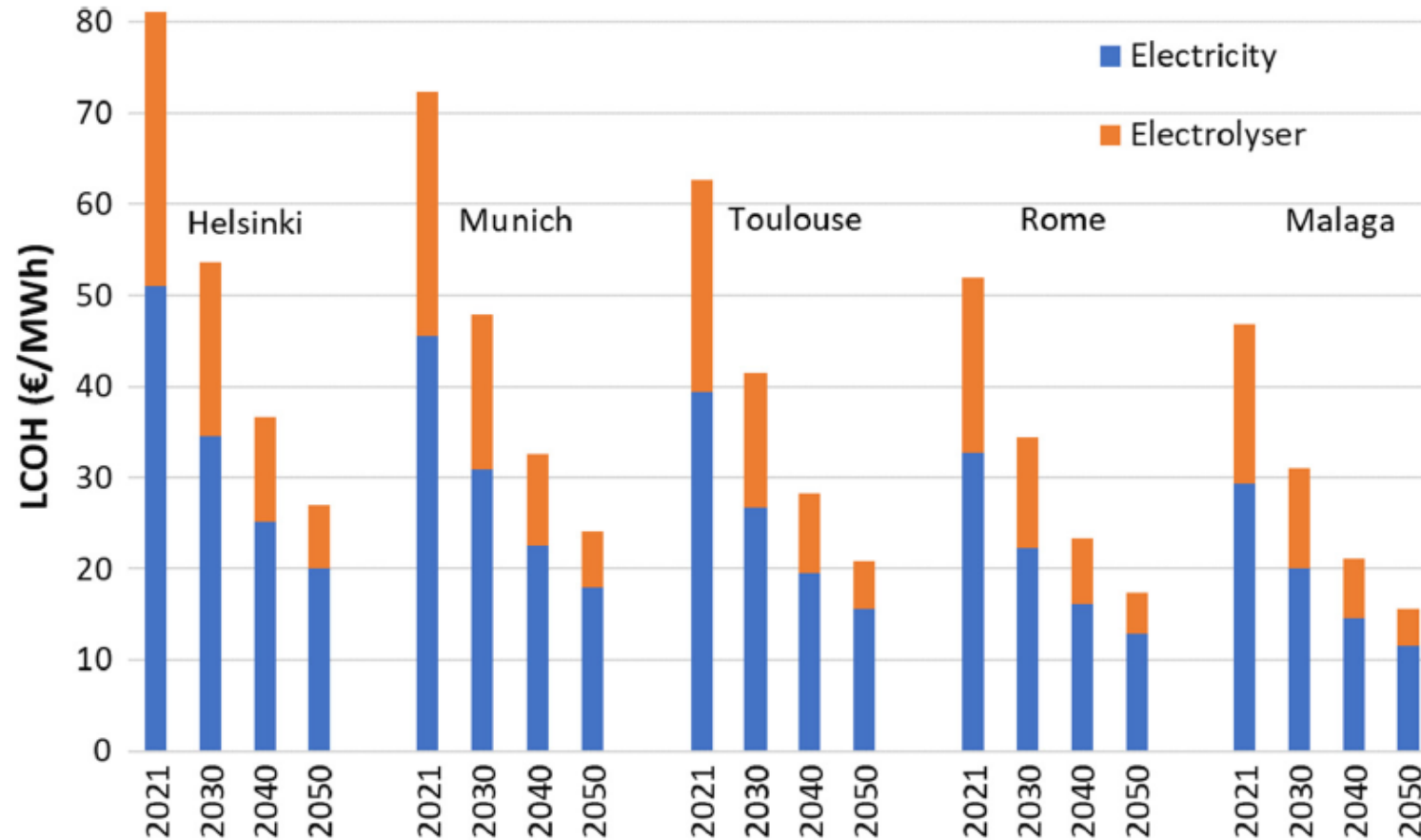
De Routekaart Elektrificatie is ontwikkeld op verzoek van de Werkgroep Power-to-Industry in opdracht van de Uitvoeringstafels Industrie en Elektriciteit onder het Klimaatakkoord.

6

2021

WHAT IS (STILL) TO BE DONE?

FROM ELECTRICITY TO ENERGY: GREEN HYDROGEN

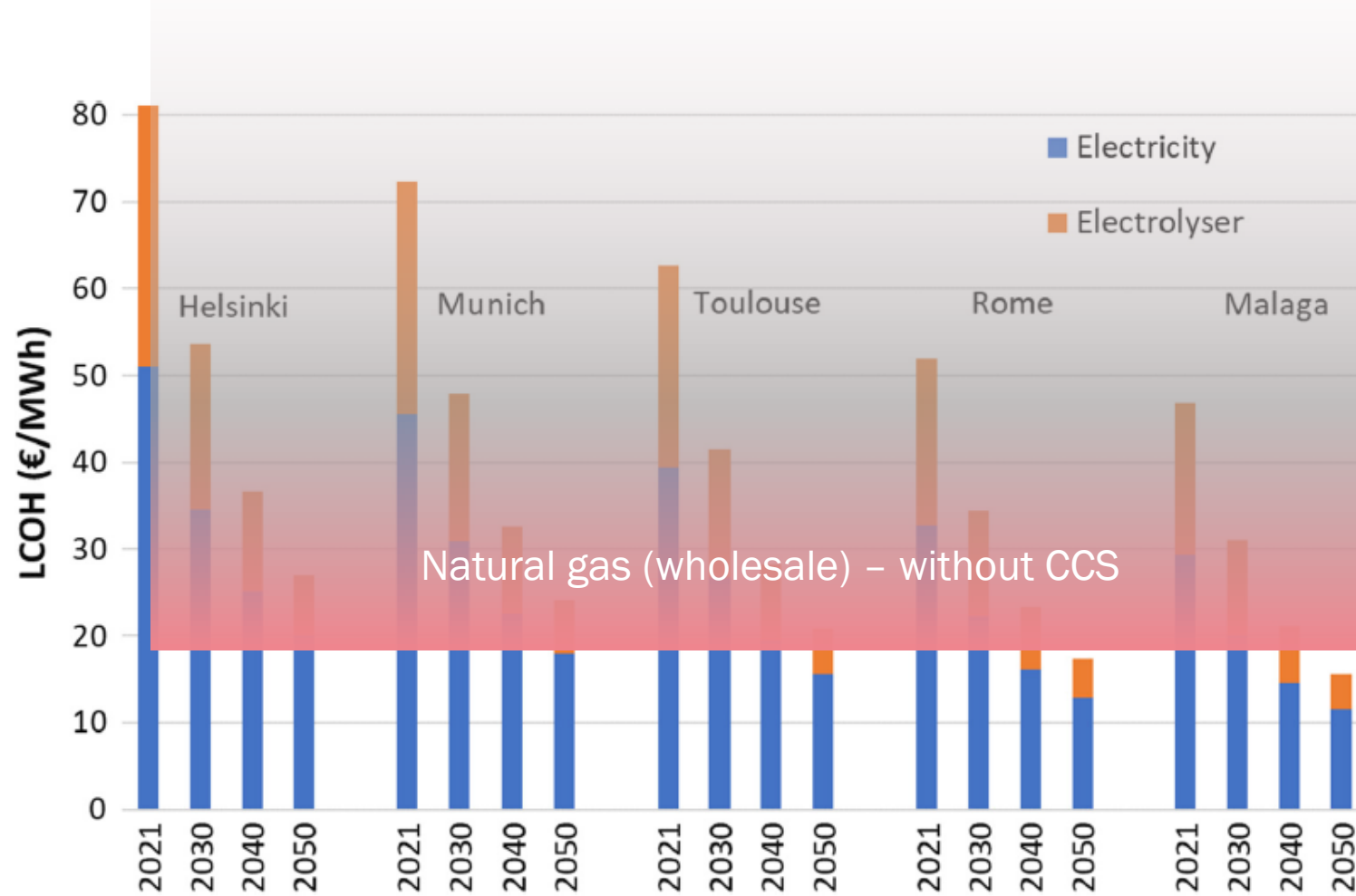


The true cost of solar hydrogen
 E. Vartiainen et al.
 Solar RRL 2021, 2100487
<https://doi.org/10.1002/solr.202100487>



Toshiba

WHAT IS (STILL) TO BE DONE? FROM ELECTRICITY TO ENERGY: GREEN HYDROGEN

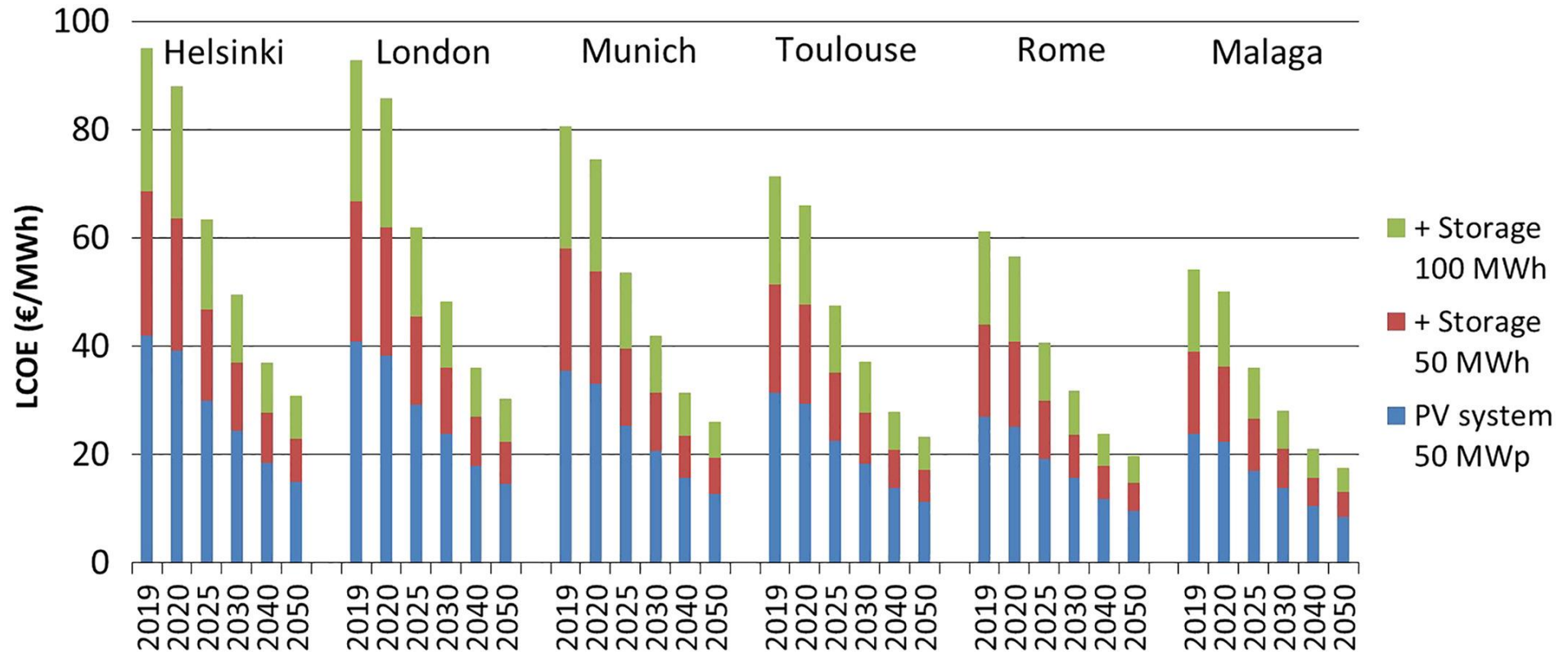


The true cost of solar hydrogen
 E. Vartiainen et al.
 Solar RRL 2021, 2100487
<https://doi.org/10.1002/solr.202100487>



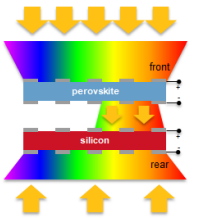
Toshiba

WHAT IS (STILL) TO BE DONE? TO MAKE GENERATION INCLUDING STORAGE COST EFFECTIVE

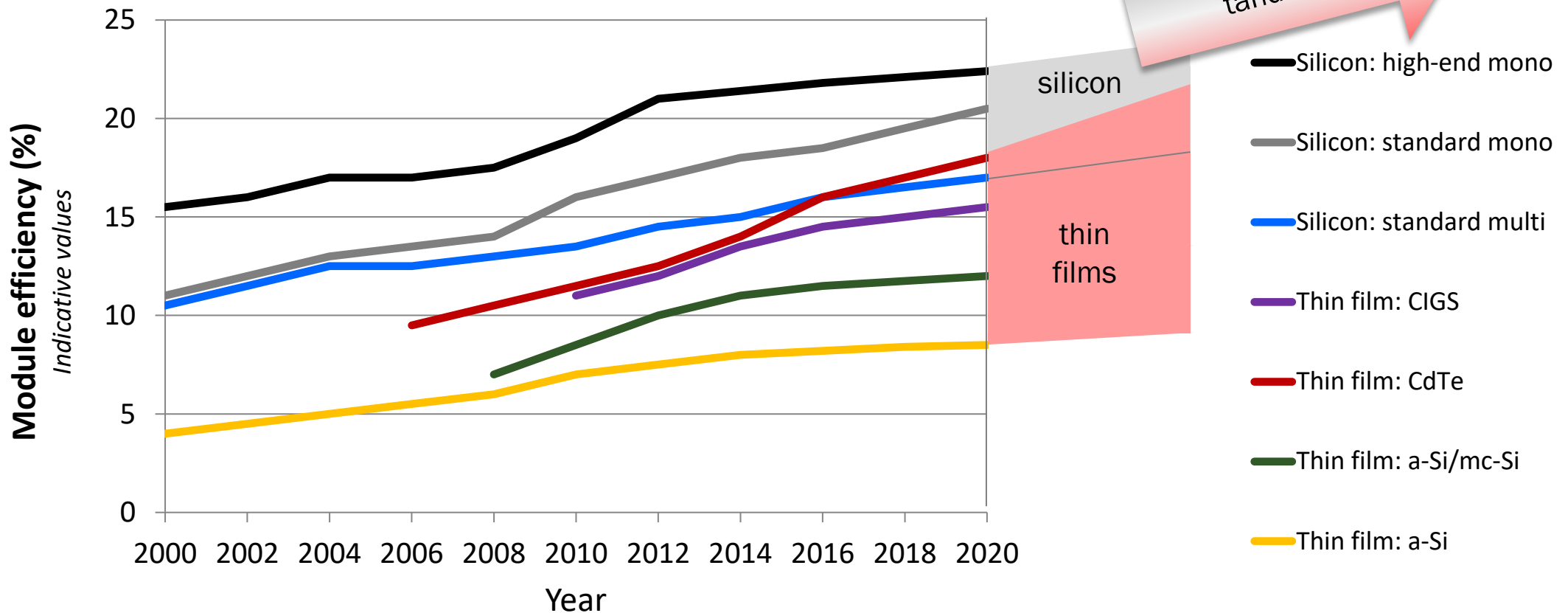


[Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity - Vartiainen - 2020 - Progress in Photovoltaics: Research and Applications - Wiley Online Library](#)

ENABLER: STILL LOWER COST (AMONG OTHERS) WITH EFFICIENCY AS LEVER



Voorbeeld van een tandem: perovskiet op silicium



WHAT IS (STILL) TO BE DONE?

FAST AND A LOT, BUT HOW?

WITH EFFICIENT TECHNOLOGY AND INTEGRATION & FUNCTION COMBINATION WHERE POSSIBLE



GROTE OPGAVEN IN EEN BEPERKTE RUIMTE

RUIMTELIJKE KEUZES VOOR EEN TOEKOMSTBESTENDIGE LEEFOMGEVING



› A HUGE POTENTIAL WITH INTEGRATION & FUNCTION COMBINATION



Tabel 2. Ruimtelijke categorieën

Ruimtelijke categorie	Horizontaal oppervlak (km ²)
Gebouwen	1.286
Woningen	543
Utiliteitsgebouwen en overig	742
Infra	4.190
Verkeersinfrastructuur	2.165
Erven en overig	2.026
Landschap	27.518
Landbouwgrond	19.152
Overig*	8.366
Water	8.668
Binnenwater	5.160
Buitenwater**	3.508
Totaal	41.662

* o.a. bos, natuur, boerenerven, recreatie

** Exclusief de Noordzee (ca. 58.000 km²)

APPLICATION CATEGORIES

POTENTIAL & EXEMPLARY SCORES FOR REALISING POTENTIAL (I.R.T. DEPLOYMENT SPEED / AVAILABILITY AND COST)

	Theoretical potential	Societal challenges	Organisational challenges	Ecological challenges	Technical challenges ^{**)}
Solar on buildings	+	+++	-	+++	0
Solar on infra	++	+	-	+	--
Solar on water ^{*)}	+++	--	-	--	---
Solar on land	+++	---	+	---	+++

^{*)} including offshore

^{**)} including integration

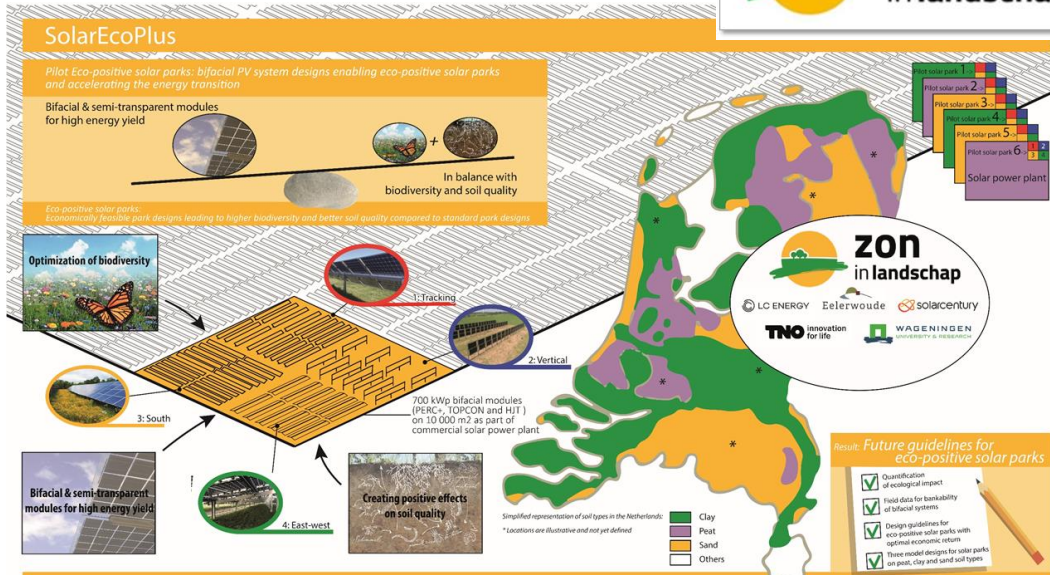
WHAT IS (STILL) TO BE DONE? FROM LOW COST TO HIGH VALUE



Semitransparent perovskite foil
(TNO/Solliance)



Energy+ flat, Henriëttedreef, Utrecht
(see <https://tki-inside-out.nl/projectpartners/>)



SolarEcoPlus
(LC Energy, TNO, WUR, Eelerwoude en SolarCentury)



Terracotta PV
(Exasun)

WHAT IS (STILL) TO BE DONE? FROM LOW COST TO HIGH VALUE



Solar foil (HyET Solar/ Vopak)



Multifunctional solar park
'De Kwekerij' (Hengelo, Gld)



MyEnergySkin, Best (NBArchitecten)



Solar Highways



Field lab solar on water @ Oostvoorse
Meer (TNO and partners)



Agri-PV: project Sunbiose
(see <https://zoninlandschap.nl/projecten/i426/sunbiose>)

WHAT IS (STILL) TO BE DONE FROM RENEWABLE TO SUSTAINABLE – CO₂-FOOTPRINT

Relative CO₂-emissions per phase (indicative ratios)

Production & installation phase

Operation phase

End-of-life phase



Solar energy now:
30 ~ 60 gCO₂-eq/kWh

- Extraction of feedstocks
- Production of materials
- Manufacturing of modules and other system components
- Transport
- Installation of system

>85%

- Generation of solar electricity
- Operation and maintenance of system and location
- Repair and replacement (when needed) of components

<5%

- Decommissioning and location recovery (when needed)
- Recycling
- Waste management

<10% (?)



Electricity from fossil fuels:
400 ~ 800 gCO₂-eq/kWh

- Extraction of feedstocks
- Production of materials
- Manufacturing of building blocks and system components
- Transport
- Building of the power plant

<1%

- Extraction and processing of fuels (coal or gas)
- Transport
- Fuel combustion and generation of electricity
- Operation and maintenance
- Repair and replacement of components

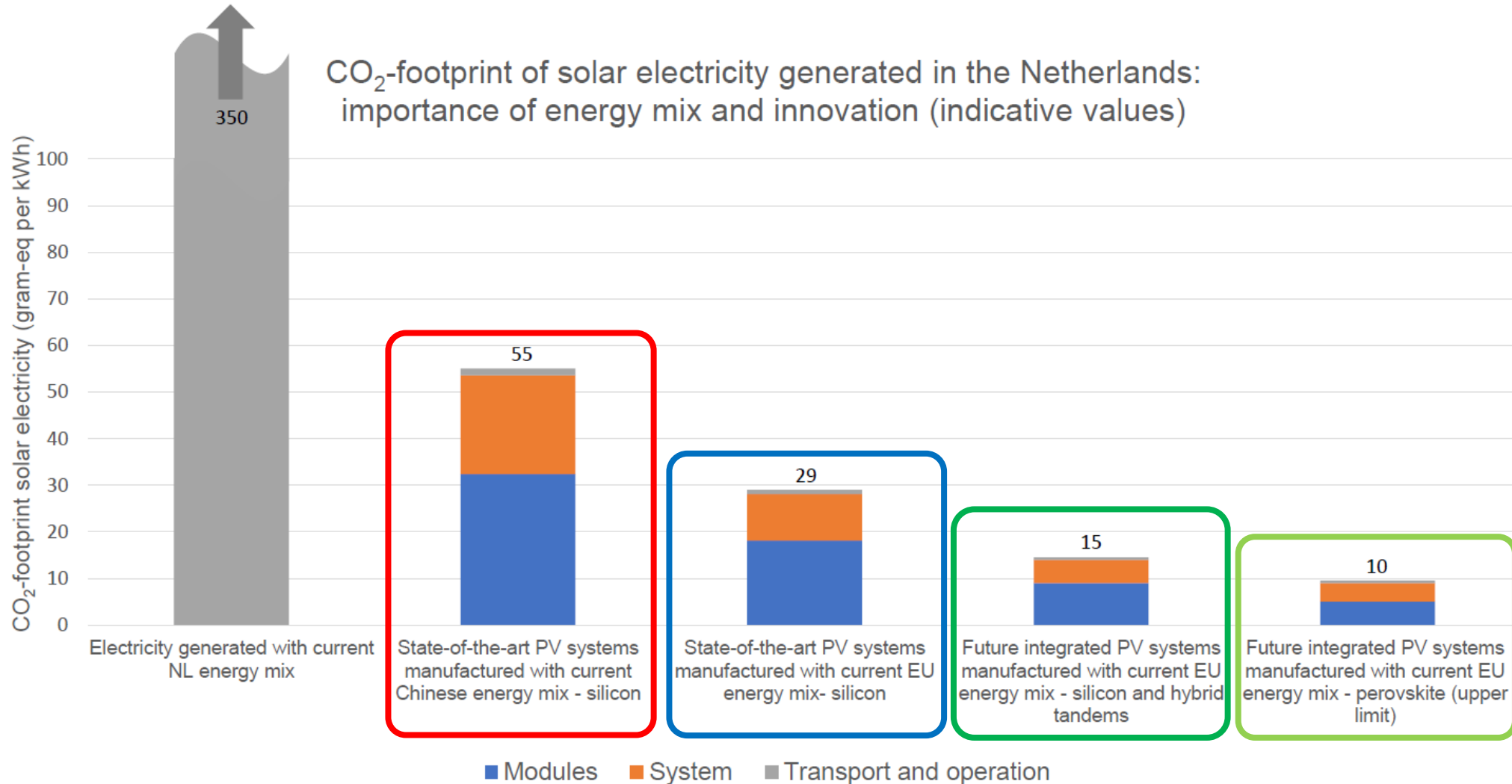
>98%

- Decommissioning and location recovery
- Recycling
- Waste management

<1%

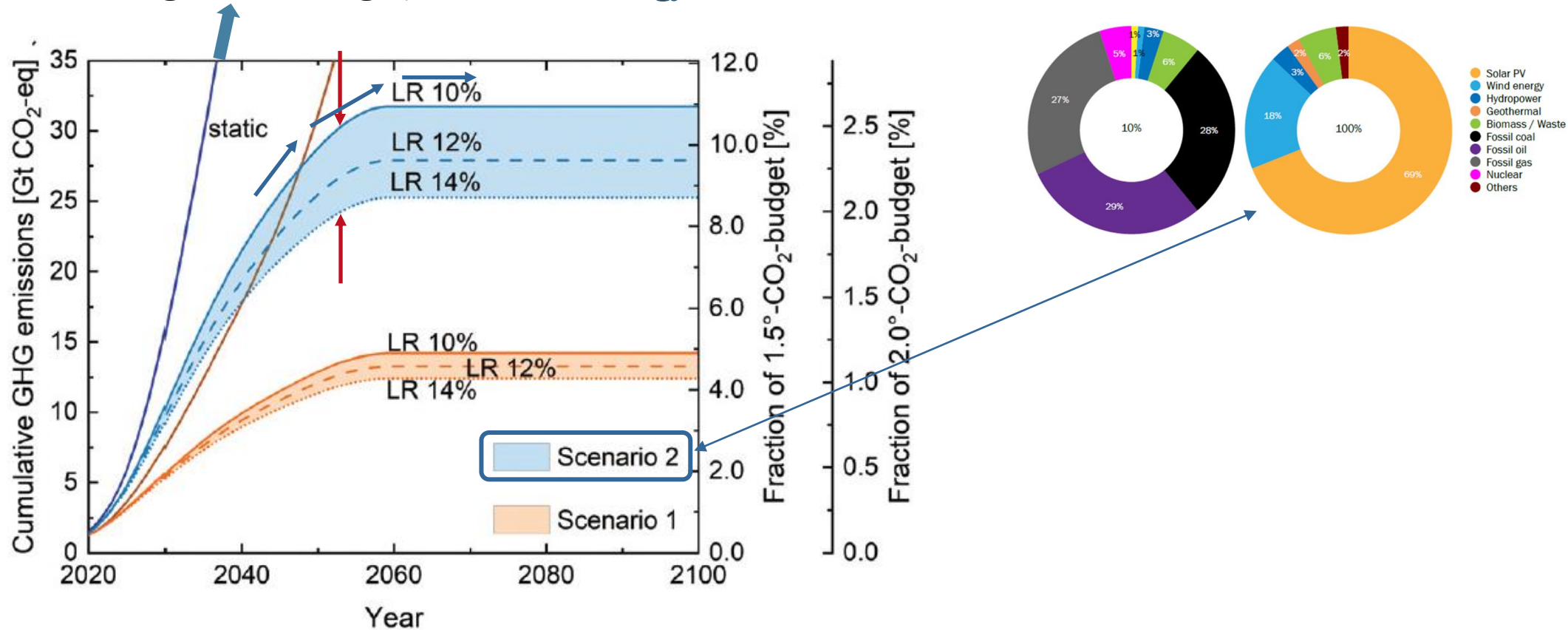
WHAT IS (STILL) TO BE DONE?

FROM RENEWABLE TO SUSTAINABLE – CO₂-FOOTPRINT



WHAT IS (STILL) TO BE DONE? FROM RENEWABLE TO SUSTAINABLE – CO₂-FOOTPRINT

Cumulative emissions by largescale manufacturing of PV systems
(as % of remaining carbon budget) – effect of **energy mix** and **innovation**

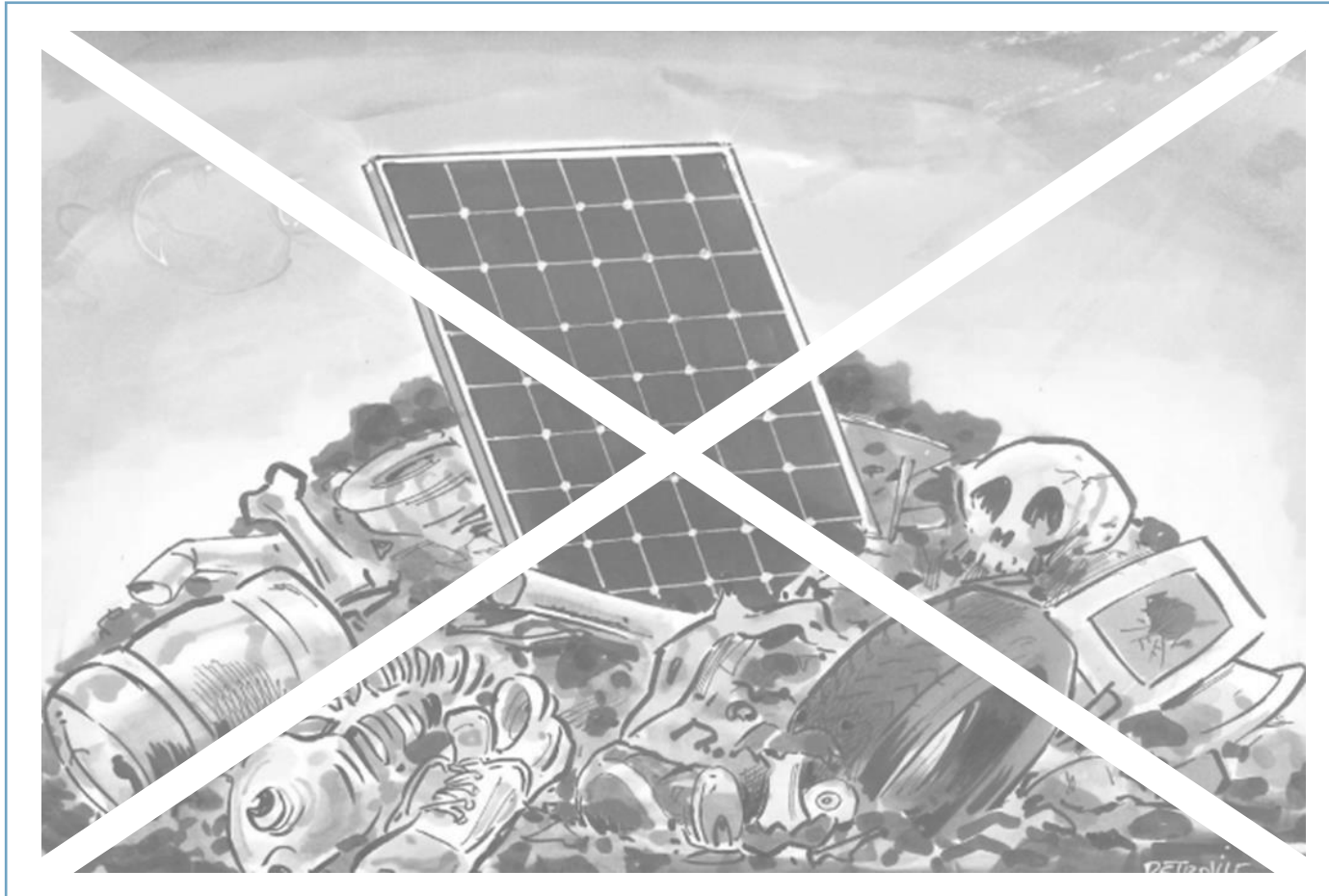


Technological learning for terawatt scale photovoltaics, J.C. Goldschmidt et al., Energy and Environmental Science 10 (2021), <https://doi.org/10.1039/D1EE02497C>

WHAT IS (STILL) TO BE DONE? TOWARDS A CIRCULAR SOLAR SECTOR



WHAT IS (STILL) TO BE DONE? TOWARDS A CIRCULAR SOLAR SECTOR



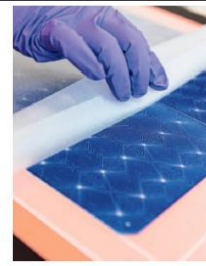
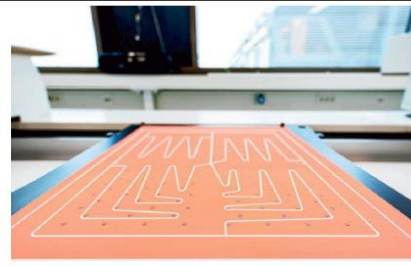
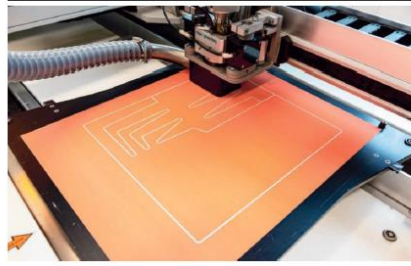
WHAT IS (STILL) TO BE DONE? TOWARDS A CIRCULAR SOLAR SECTOR

W10 Wetenschap

ZATERDAG 4 DECEMBER & ZONDAG 5 DECEMBER 2021

ZATERDAG 4 DECEMBER & ZONDAG 5 DECEMBER 2021

Wet



MATERIALEN

Eindelijk een zonnepaneel dat wél te recyclen is

Afgedankte zonnepanelen leveren een grote afvalberg op, want goede recycling is niet mogelijk. Een nieuw type paneel moet dit probleem oplossen.

Tekst **Amanda Verdonk** Foto's **Eric de Vries**

Ssh. Een grote pers draait meer op een tafel van een paar vierkante meter. Daarop ligt een zwart kunststof zél en daaronder ligt een klein zonnepaneel ter grootte van een platenboos. Maurice Goris, technisch medewerker in het Solar Lab van onderzoeksinstuut TNO in Petten, heeft het zonnepaneel zojuist in de laminator op

zo'n 150 graden. De lucht wordt eruit gesperst zodat het paneel steviger wordt. In principe hoeft er hierna alleen nog maar een aluminium frame omheen en dan zou dit volledig recyclebare zonnepaneel het dak op kunnen. Zonnepanelen zijn als toets - ze zijn opgebouwd uit verschillende lagen. De zonnecellen zitten in het midden en daar omheen zit aan weerszijden een dun laagje hechtfolie van kunststof. Aan de voorkant zit een glasplaat en aan de achterkant meestal een kunststof paneel. Door de druk en hitte van de laminator versmelt de hechtfolie met de andere materialen, waardoor zijn de panelen beter be-

stand tegen weersinvloeden. Maar die versmelting maakt hergebruik van de materialen lastig.

Zonnepanelen hebben niet het eeuwige leven - na zo'n vijftienvintig à dertig jaar zijn ze rijp voor de sloep. Afvalverwerkers kunnen de panelen echter niet volledig demonteren. Daarom belanden ze nu in een verguizer waar ze worden fijngepulverd. Door die versmelting kunnen het glas van de glasplaat en het silicium en zilver uit de zonnecellen alleen worden hergebruikt in laagwaardige toepassingen zoals isolatiemateriaal, niet in nieuwe zonnepanelen. Daarvoor moeten de stoffen zo zuiver mogelijk zijn, en niet verontreinigd met andere stoffen.

Enorme afvalberg

Het aantal zonnepanelen in Nederland groeit hard. Het afgelopen jaar is het totale vermogen in één jaar tijd met 45 procent toegenomen, blijkt uit het *National Solar Trendrapport 2021* van onderzoeksbureau DNE Research. Dat levert binnen een aantal decennia een enorme afvalberg op.

De eerste generatie komt nu al van de daken af, vertelt Martin Späth, onderzoeker bij TNO, na ons bezoek aan de fabriek. „Dat zijn missies van zeventien à twintig jaar, peanuts. Maar in 2040 komen de panelen vrij die vanaf 2015 zijn geïnstalleerd, toen de opbouw begon. Dan hebben we het over 100.000 à 200.000 ton afval. En in 2050 zelfs 400.000 tot 500.000 ton.“

Hoe gaan we dat zonnepaneelafval op een zinvolle manier recyclen? In het buitenland zijn enkele fabrieken die dit speciaal richten op zonnepanelerecycling en daardoor zuiverder reststromen maken. Maar ook die materialen vinden hun weg nog niet naar een nieuw zonnepaneel. Daar moeten zitten er schadelijke stoffen in verwerk, zoals fluor en lood, die tijdens het recyclen kunnen vrijkomen.

Späth wilde weten of hij deze pijnpunten kon oplossen en een volledig herbruikbaar, circulair, zonnepaneel kon maken. Hij kwam in contact met bedrijven die recyclebare en veilige materialen aan het ontwikkelen zijn. Zo gebruikt de Haagse zonnepaneelfabrikant Exasun een glazen achterpaneel. Gangbare zonnepane-

Productie van recyclebare zonnepanelen bij TNO in Petten. Zonnepanelen bestaan uit aan elkaar hechtende laagjes. Die versmelting maakt het lastig om de materialen te hergebruiken.

van chemiebedrijf DSM, een hechtfolie die, ondanks die versmelting, weer volledig los kan raken van de andere materialen. Voor die ontmanteling heeft TNO een vrij eenvoudig proces ontwikkeld, waar geen speciale apparatuur voor nodig is. Hoe dat precies werkt wil Späth uit concurrentieoverwegingen niet vertellen.

Opboksen tegen Chinese panelen

Met deze ingrediënten is in het Pettenese lab een nieuw, circulair, zonnepaneel in elkaar gezet. Een verdieping lager laat technisch medewerker Goris de klimaatkamers zien. Dit zijn kasten waarin de panelen worden blootgesteld aan een hoge lichtvochtigheid en sterke temperatuurswisselingen. Goris: „De panelen worden vijfhonderd uur getest onder 85 graden en 85 procent luchtvochtigheid. En in de thermal cycle kast doorlopen ze honderd keer een cyclus van -40 tot 85 graden.“ Eerdere versies hebben dat proces zes keer overleefd zonder achteruitgang in stroom en spanning, en zouden daardoor goed genoeg zijn om minstens vijftienvintig jaar in de buitenlucht door te brengen. Begin volgend jaar doorlopen ook de grote panelen deze struimtesten.

In principe zouden de nieuwe zonnepanelen volgend jaar op de daken kunnen liggen, maar het is maar de vraag of ze kunnen opboksen tegen de grote volumes Chinese zonnepanelen

TU Delft
„Een simpeler ontwerp is beter“

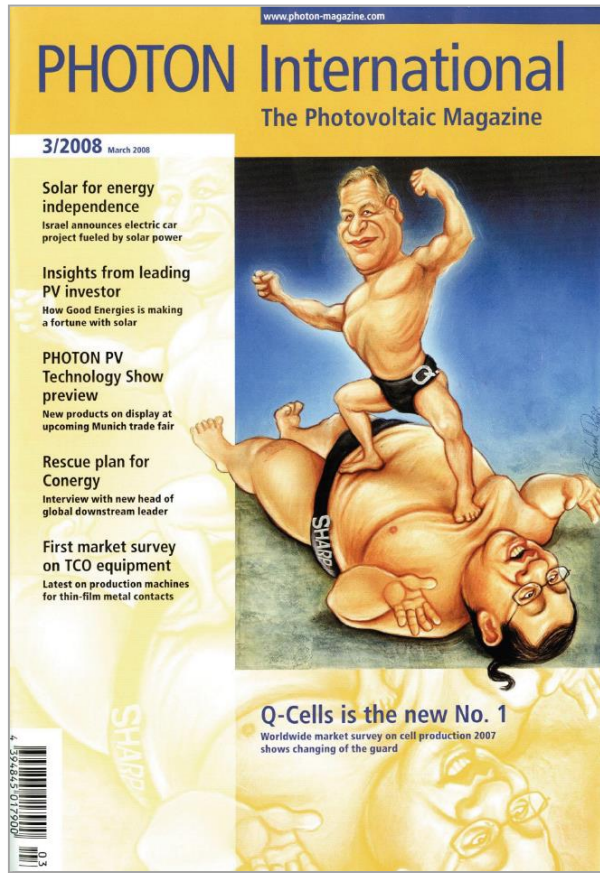
Duurzaam ontwerp van zonnepanelen is nog een relatief nieuw thema, vertelt Miro Zeman, hoogleraar fotovoltaïsche materialen aan de TU Delft. „Circulair wordt enorm belangrijk, als je kijkt naar de enorme aantallen panelen die op ons afluimen. Het onderzoek van TNO is natuurlijk fantastisch, maar we zouden dit thema in Nederland breder moeten aanpakken, zodat meer organisaties meedoen om de weg naar circulaire zonnepanelen te versnellen.“

Ook Zeman en zijn collega's werken aan verschillende aspecten van circulaire zonnepanelen. Zo onderzoeken zij of het mogelijk is om de hechtfolie helemaal weg te laten. „Een ontwerp is altijd beter als het simpeler is. En is toch materiaal en energie nodig om zo'n folie te maken. Ook zijn we aan het kijken of het mogelijk is om het zilver in de zonnecellen te vervangen voor koper en willen we het gebruik van indium (een zeer schaars materiaal) minimaliseren. Indium wordt waarschijnlijk schaars, want het wordt veel gebruikt in elektronica. Een dunne laag geleidende laagje is beter, dus we zoeken naar de optimale balans tussen dikte en geleidbaarheid.“

NRC, 4/5 December 2021
[Eindelijk een zonnepaneel dat wél te recyclen is - NRC](#)

WHAT IS (STILL) TO BE DONE?

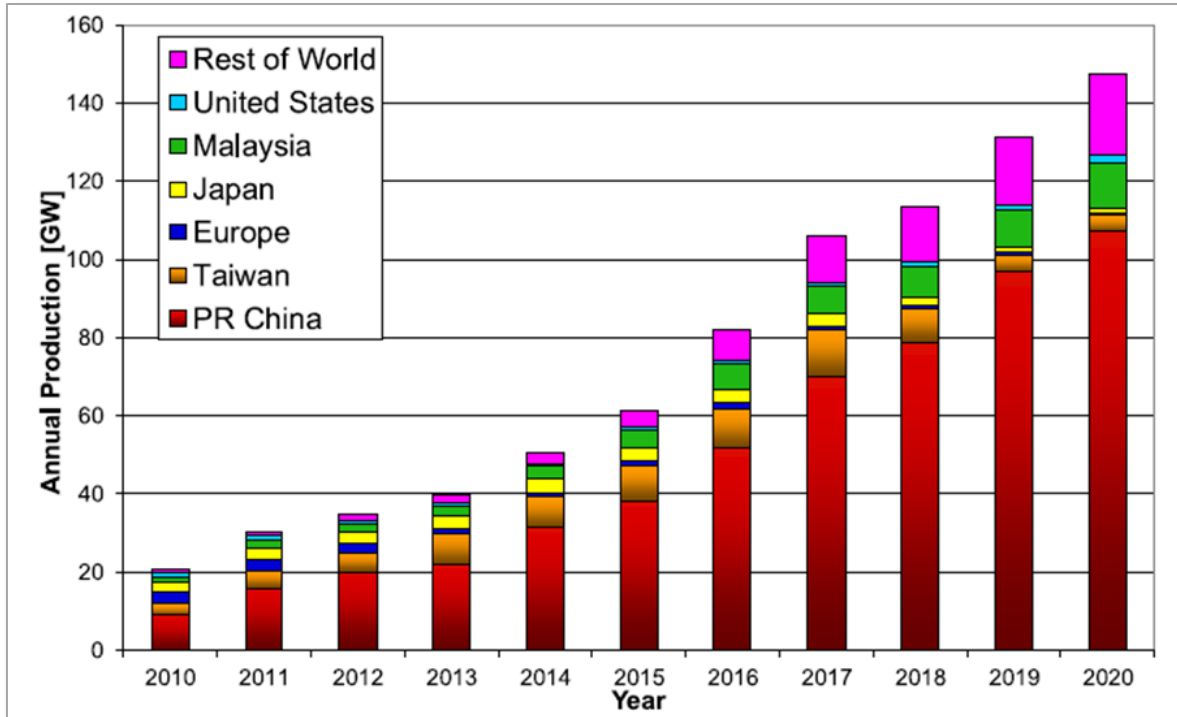
EUROPE: FROM DEPENDENT TO PV (ALSO) MADE IN EUROPE



2008

WHAT IS (STILL) TO BE DONE?

EUROPE: FROM DEPENDENT TO PV (ALSO) MADE IN EUROPE



The screenshot shows the website for the European Solar Initiative. The main heading is "The European Solar initiative" with a sub-heading "Reaching a 20 GW annual production capacity by 2025". The page features a background image of solar panels on a building roof. Text on the right side highlights the market's resilience during the COVID-19 pandemic and the initiative's goal of scaling up the solar PV industrial ecosystem in Europe by 2025.

European Solar Initiative

Accelerator Investment Get in touch

The European Solar initiative

Reaching a 20 GW annual production capacity by 2025

The impressive growth of the European solar PV market demonstrates the resilience and strength of solar in the face of the COVID-19 pandemic, opening important prospects for European solar PV producers, and positioning solar PV technologies as strategic to the EU economy.

European companies and research centres have demonstrated their global innovative edge, developing world-leading high-efficiency cell and module technologies as well as future-proof solar applications on buildings, water, and agricultural land.

Anchored in the Industrial Strategy presented by the European Commission, the European Solar Initiative aims at scaling up the solar PV industrial ecosystem in Europe at the 2025 horizon.

2021

› **THE STORYLINE**

SOLAR ENERGY: A SUCCESS STORY THAT IS ONLY BEGINNING

› **Developments so far:**

- › Our view on solar photovoltaics (PV);
- › Markets and costs;
- › Technology and applications.

› **What is (still) to be done? To solar energy 2.0:**

- › From global niche to impact;
- › From electricity to energy;
- › From low cost to high value;
- › From renewable to sustainable;
- › From dependency to PV (also) made in Europe.

› **What is standing in the way? Remaining myths and barriers**

› **The developments in bird's eye view**

› **WHAT IS STANDING IN THE WAY?** **REMAINING MYTHS EN BARRIERS**

› Solar energy is at the end of its development (a.k.a.: the technology is available, now we only need to use it)

←→ *Developments so far are spectacular, but the best/ the necessary is yet to come*

› For the energy transition we need all options

←→ *Lack of focus leads to uncertainty and slowing down*

› Nuclear energy is coming, we can relax in deployment of solar and wind

← → *We are in a great hurry and cannot afford to wait*

› **THE STORYLINE**

SOLAR ENERGY: A SUCCESS STORY THAT IS ONLY BEGINNING

› **Developments so far:**

- › Our view on solar photovoltaics (PV);
- › Markets and costs;
- › Technology and applications.

› **What is (still) to be done? To solar energy 2.0:**

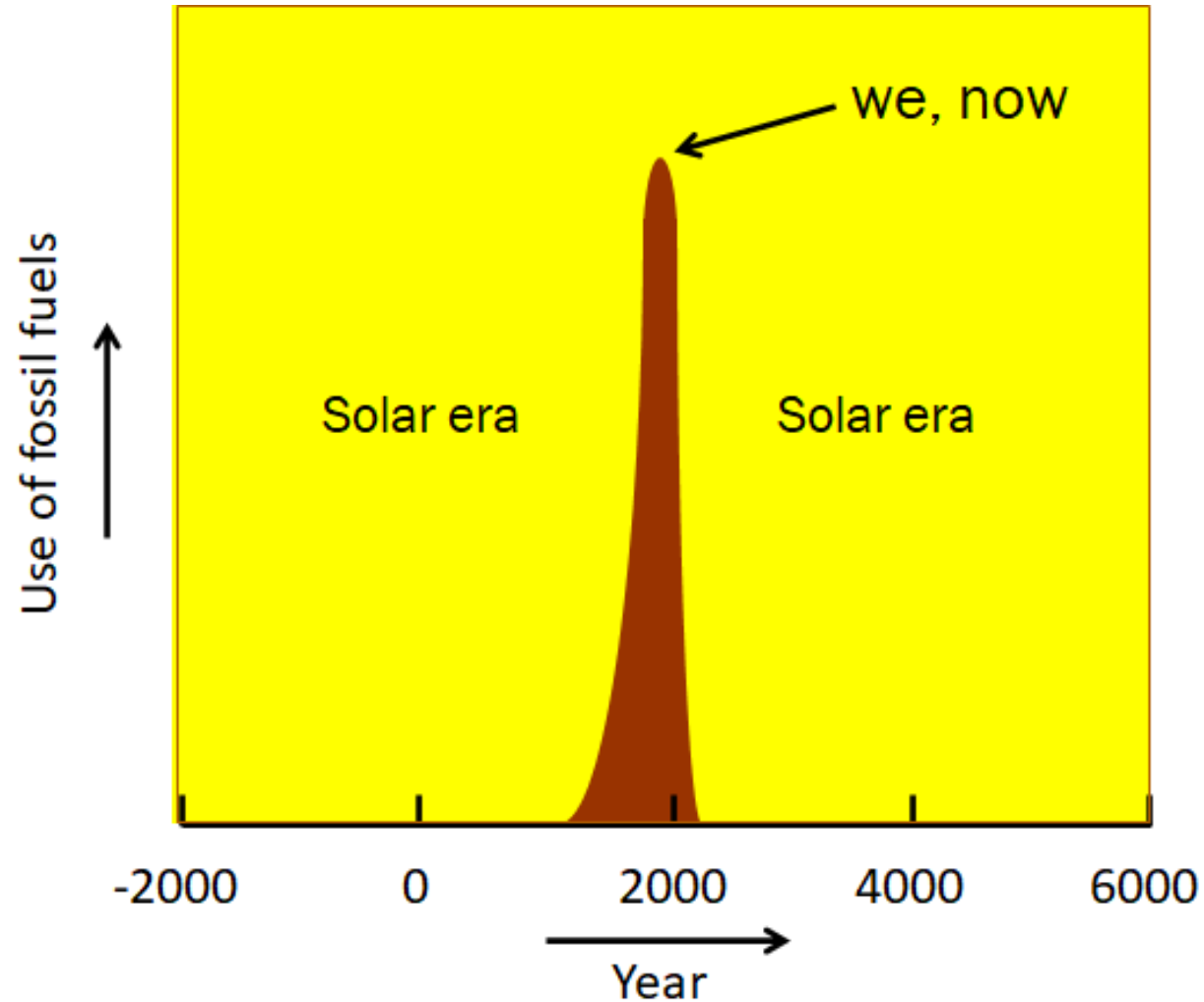
- › From global niche to impact;
- › From electricity to energy;
- › From low cost to high value;
- › From renewable to sustainable;
- › From dependency to PV (also) made in Europe.

› **What is standing in the way? Remaining myths and barriers**

› **The developments in bird's eye view**

THE DEVELOPMENTS IN BIRD'S EYE VIEW

FROM SOLAR TO SOLAR IN ALL ITS (DIRECT & INDIRECT) FORMS

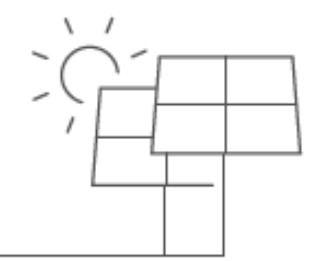
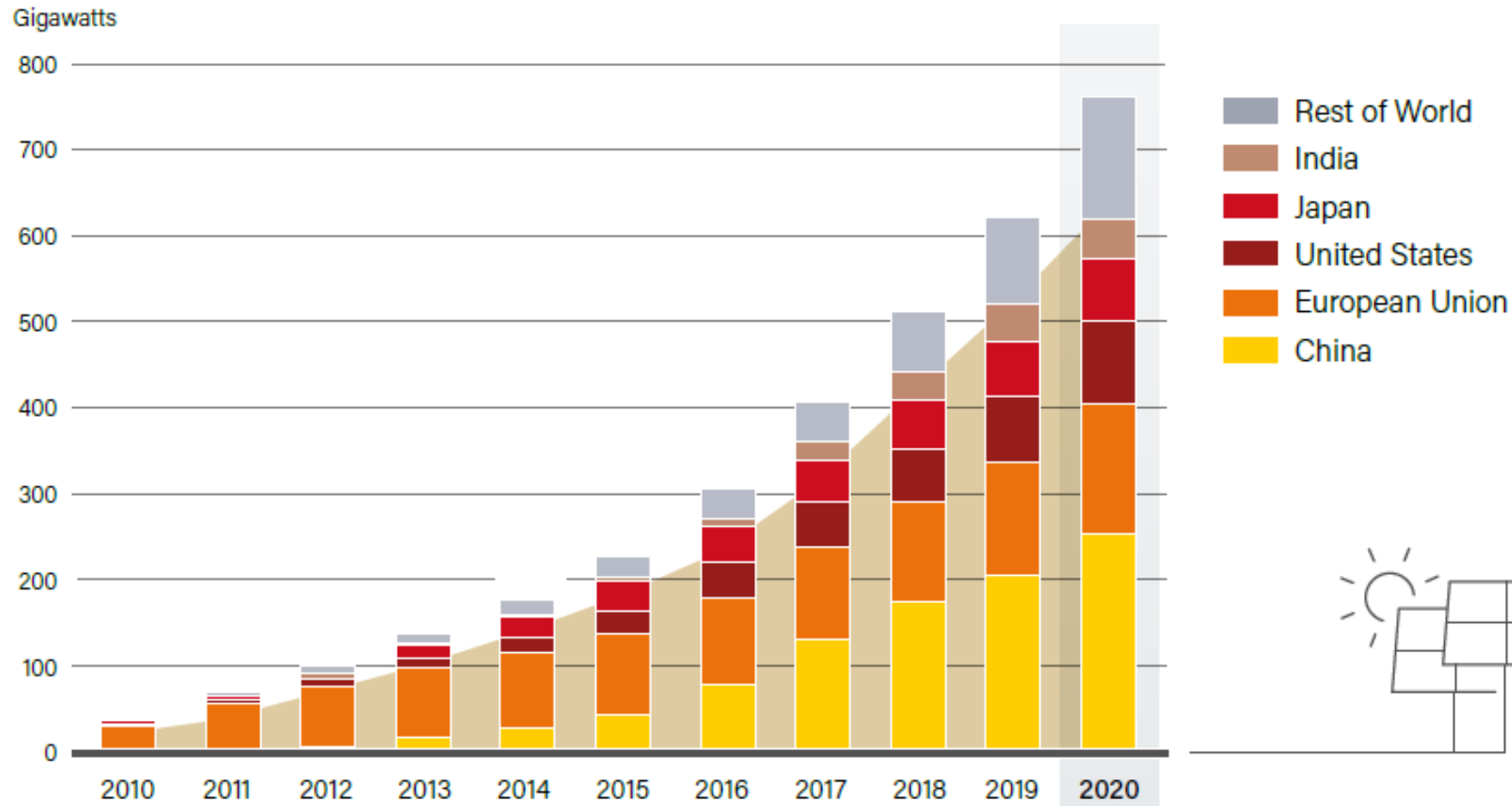




THANK YOU FOR YOUR ATTENTION

**WHITE PAPER ON SUSTAINABILITY OF SOLAR (IN DUTCH)
PUBLISHED ON 9 DECEMBER – SEE [TNO.NL](https://www.tno.nl)**

› ONTWIKKELINGEN TOT NU TOE MARKT – PER REGIO



› ONTWIKKELINGEN TOT NU TOE

OPWEKKOSTEN GROTE SYSTEMEN

