



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Czyste energie

Wykład 2

Wprowadzenie do energetyki słonecznej i fotowoltaiki

dr inż. Janusz Teneta

C-3 pok. 8 (parter), e-mail: romus@agh.edu.pl

Wydział EAIiIB
Katedra Automatyki i Robotyki

AGH Kraków 2020

Energia słoneczna prąźródłem innych źródeł energii



BIOMASA



BIOGAZ ROLNICZY



ROPA I GAZ



HYDROENERGIA



WĘGIEL



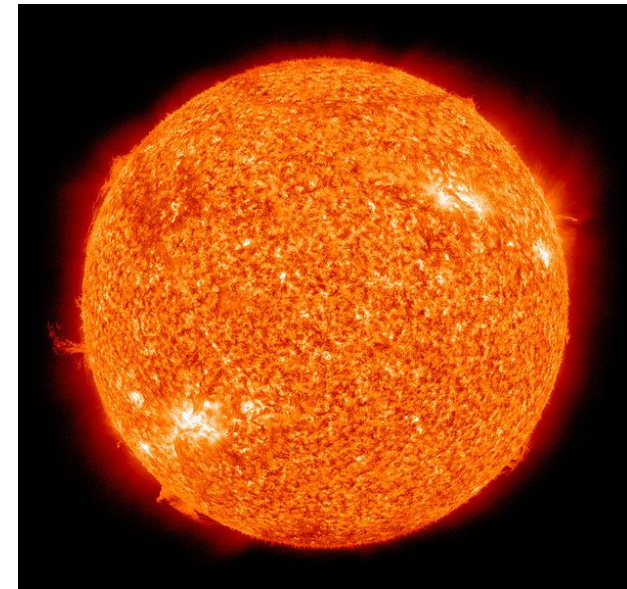
WIATR



Słońce

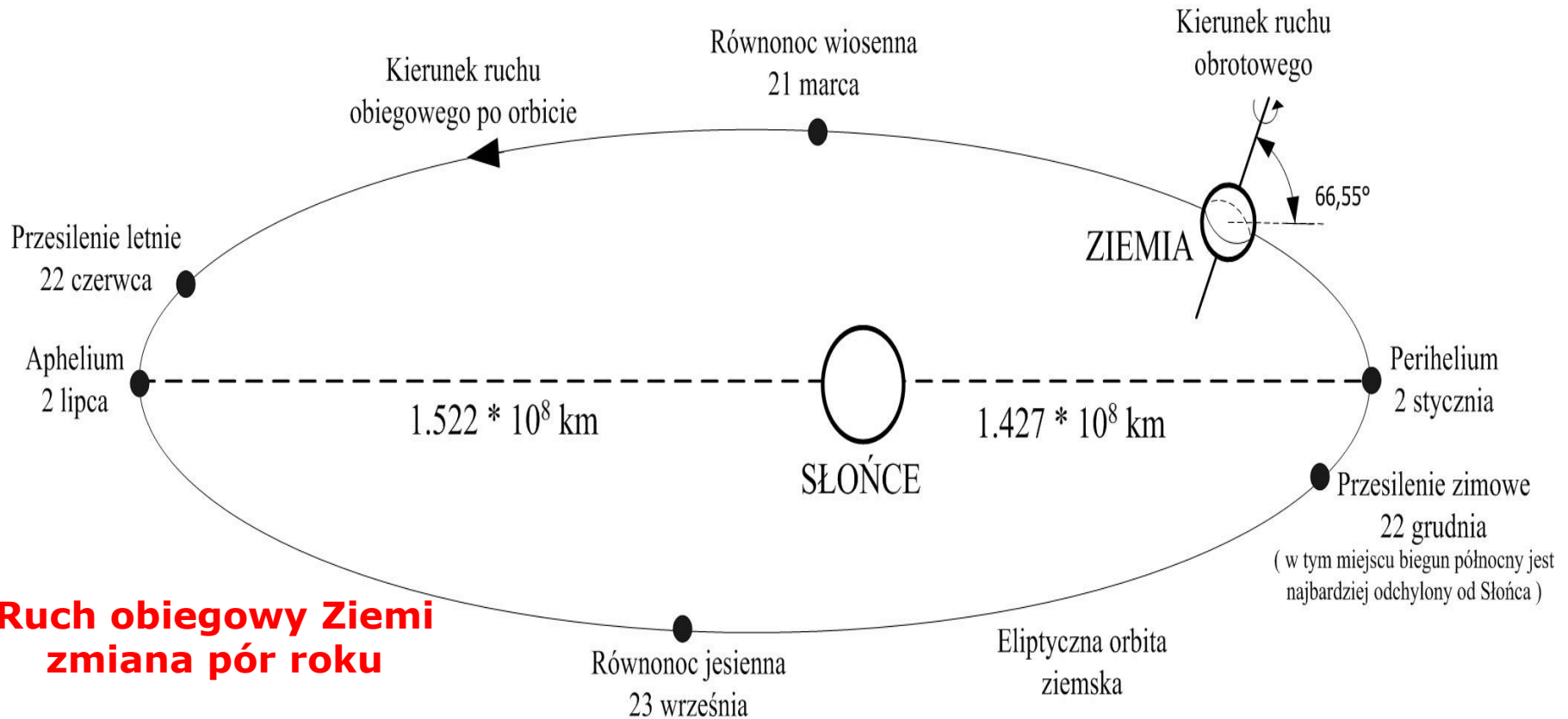
- Centralna gwiazda Układu Słonecznego, najjaśniejszy obiekt na niebie i główne źródło energii docierającej do Ziemi
- Kula zjonizowanego gazu o masie około $1,9891 \times 10^{30}$ kg (333 950 mas Ziemi)
- Średnica $1,392 \times 10^6$ km (109 średnic Ziemi)
- Szacowana temperatura jądra ok. $1,36 \times 10^7$ K
- Efektywna temperatura na powierzchni 5780 K
- Wiek Słońca szacowany na 4 600 000 000 lat
- Przemiany jądrowe: fuzja 4 atomów wodoru w jedno jądro helu + emisja energii 26,732 MeV (98% zabierają fotony, 2% neutrino)
- Moc promieniowania $3,827 \times 10^{26}$ W

źródło: www.wikipedia.pl



Geometria słoneczna

Ruch obrotowy Ziemi dzień - noc



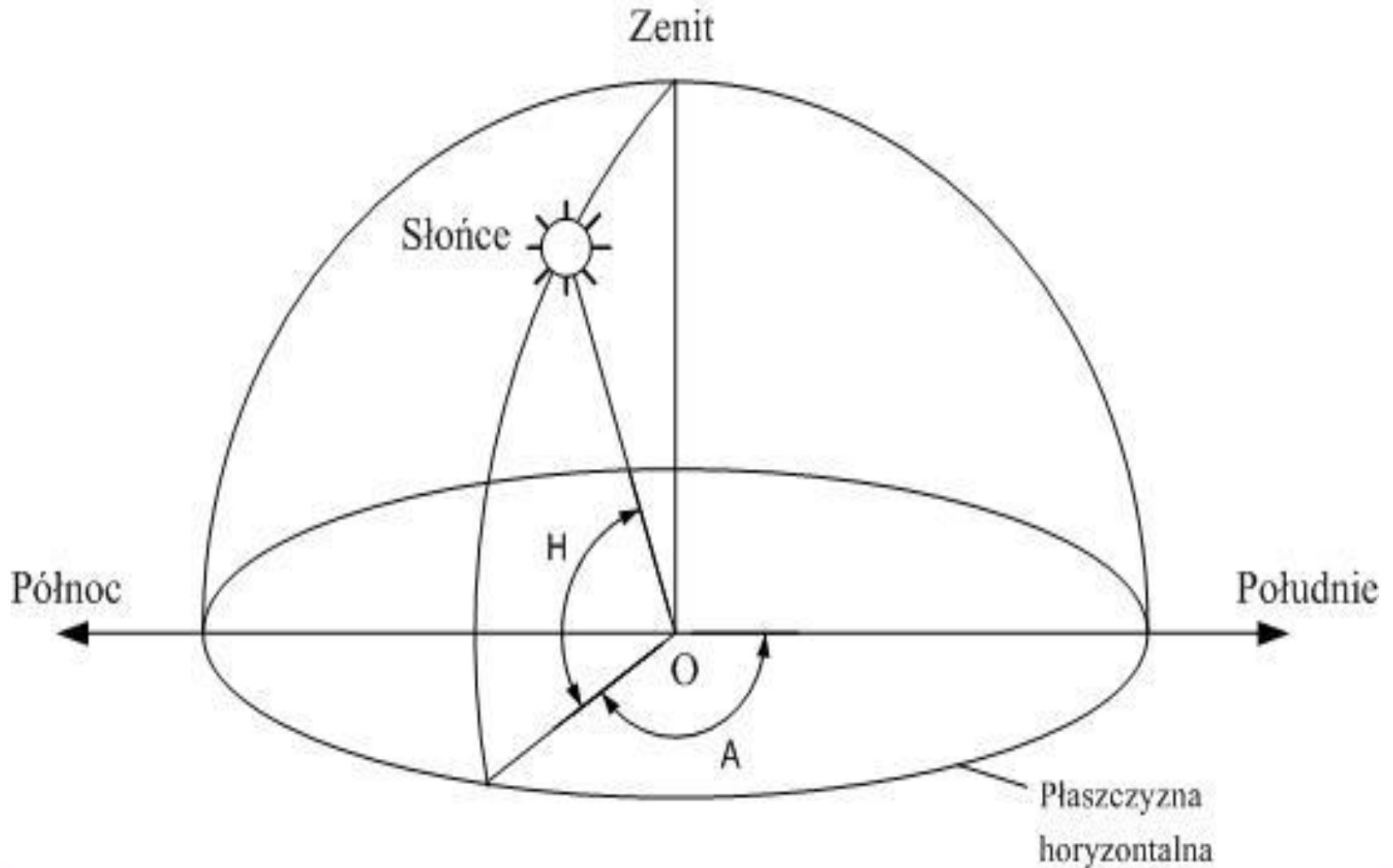
Ruch obiegowy Ziemi zmiana pór roku

Pory roku na półkulach północnej i południowej są przesunięte względem siebie o 6 miesięcy

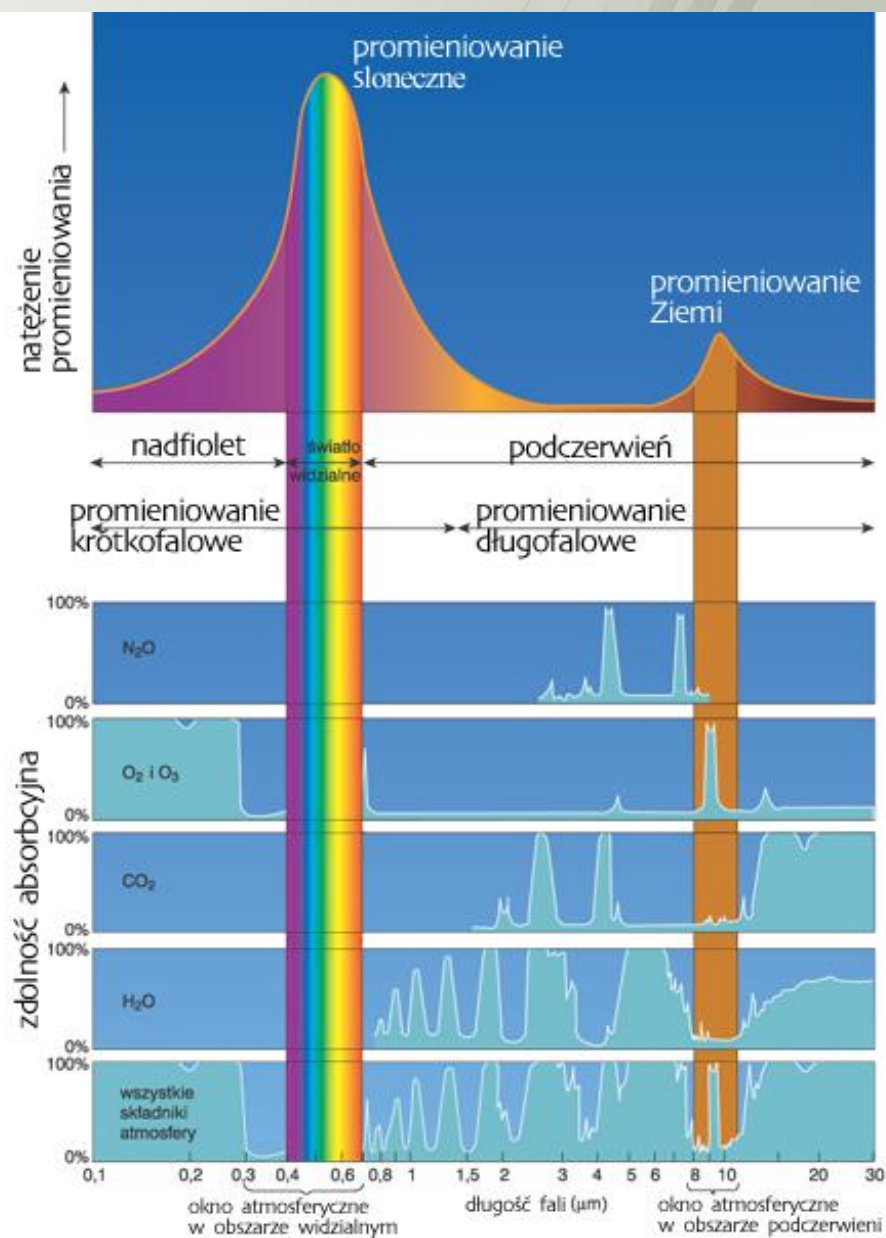
Stała słoneczna

- Całkowita energia, jaką promieniowanie słoneczne przenosi w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca (1 j.a.) przed wejściem promieniowania do atmosfery (na wysokości ok. 100km nad powierzchnią Ziemi)
- Średnia wartość stałej słonecznej wynosi około 1366,1 W/m²
- Wartość stałej słonecznej podlega zmianom zgodnie z cyklem aktywności Słońca (cykl 11 lat, zmiana ok. 0,1%) oraz z powodu ruchu obrotowego Słońca (cykl 27 dni, zmiana ok. 0,2%)
- Rzeczywista wartość energii strumienia promieniowania słonecznego ponad ziemską atmosferą zmienia się w granicach 1,32-1,41 kW/m² w cyklu rocznym (ruch obiegowy Ziemi wokół Słońca).

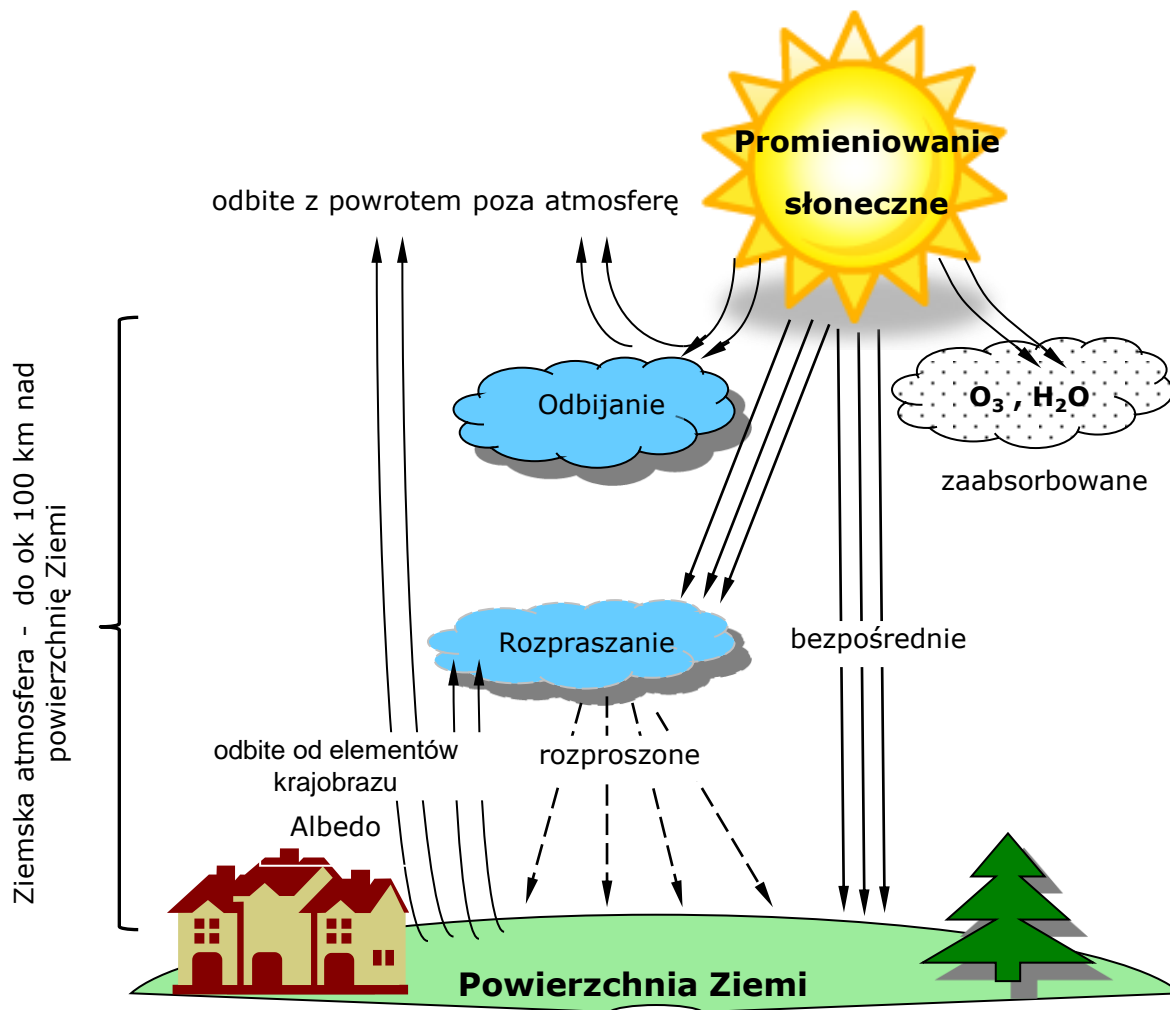
Azymut i elewacja Słońca



Widmo promieniowania słonecznego i zjawiska jego absorpcji w różnych składnikach ziemskiej atmosfery



Zjawiska w ziemskiej atmosferze



Struktura promieniowania słonecznego

- Bezpośrednie
- Rozproszone
- Odbite (współczynnik Albedo)
- Zaabsorbowane (emisja wtórna)

Źródło: weather.uwaterloo.ca



Droga promieni słonecznych przez atmosferę – współczynnik masy powietrza

AMm

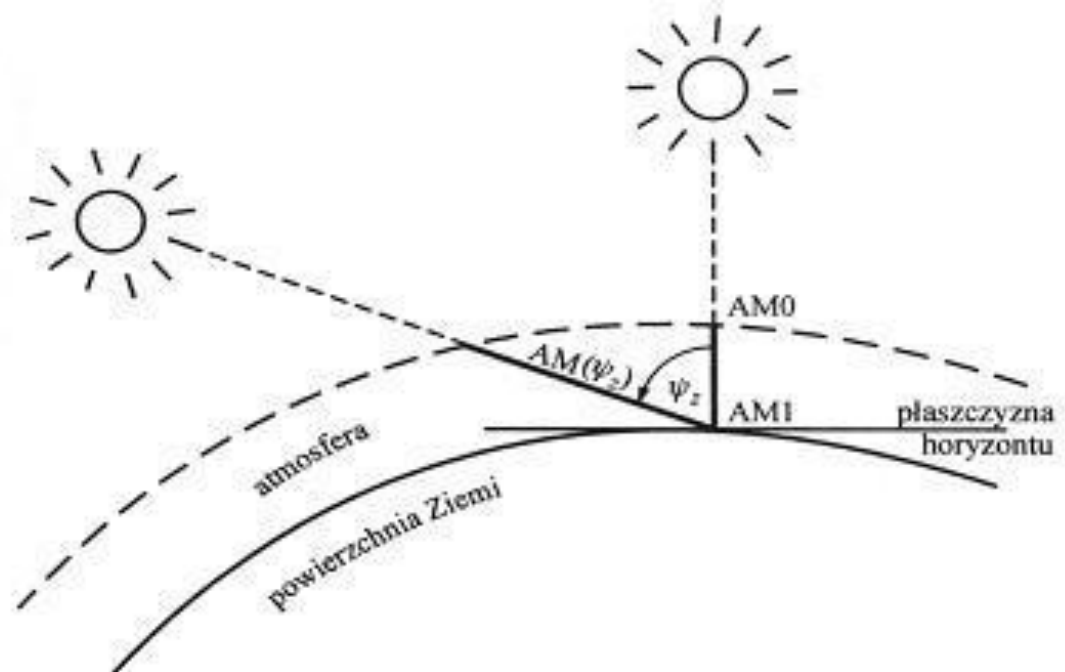
$$m = \frac{1}{\cos \psi} \quad \text{dla } \psi < 70^\circ$$

lub

$$m = \left[\cos \psi + \frac{0,15}{(93,885 - \psi)^{1,253}} \right]^{-1} \frac{p}{p_0}$$

gdzie: p_0 – 1013 hPa
 p – rzeczywiste ciśnienie atmosferyczne [hPa]

dla $\psi < 89^\circ$



Pomiary promieniowania słonecznego

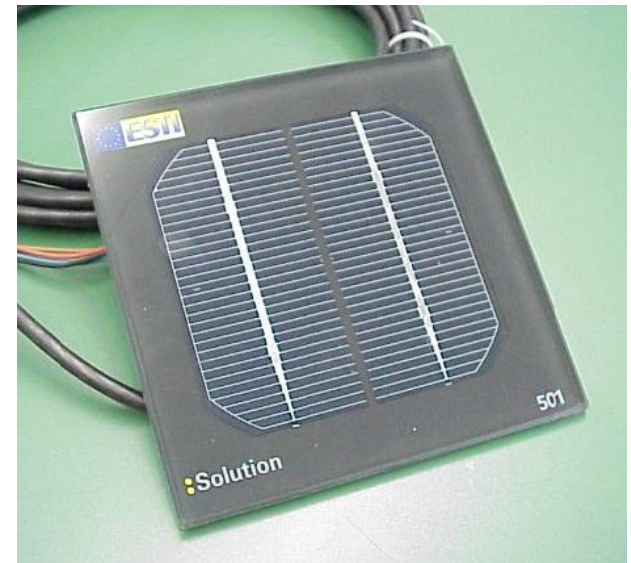
Pyranometr (solarymetr), przyrząd do pomiaru całkowitego promieniowania słonecznego (promieniowanie w atmosferze ziemskiej) w zakresie $0,3-3 \mu\text{m}$, padającego na poziomą płaszczyznę.



Główną częścią pyranometru jest czujnik w postaci termoelementu lub zespołu termoelementów (termostos), a pomiar polega na pomiarze powstającej w termoelemencie siły elektromotorycznej, proporcjonalnej do natężenia padającego promieniowania. Czujnik jest osłonięty ekranem (zwykle szklana czasza) zatrzymującym promieniowanie o długości fali większej od $3 \mu\text{m}$ i chroniącym go od wpływu warunków zewnętrznych (wiatru, opadów).

Ogniwo wzorcowe ESTI (type) Sensor

- ESTI-Sensor (European Solar Test Installation) składa się z przepołowionej celi krzemowej. Zaciski jednej połowy są rozwarte, natomiast druga połowa zwarta jest przez obciążenie (20mOhm).
- Sensor mierzy natężenie promieniowania słonecznego pod napięciem 30mV, około sześciokrotnie wyższym niż na pyranometrze.
- Promieniowanie jest proporcjonalne do prądu zwarciovego w pierwszej połowce sensora, natomiast temperatura jest proporcjonalna do napięcia układu otwartego drugiej połowy.



Zastosowanie:

- Monitorowanie instalacji fotowoltaicznych wykonanych z takiego samego materiału co sensor.
- Mierzenie temperatury wewnętrznej modułu, co pozwala na określenie charakterystyk względem warunków nominalnych (STC – Standard Test Condition)

Pomiar promieniowania rozproszonego

Układy przestronowe



Pierścień K&Z



Tracker K&Z



Tracker promieniowania słonecznego



AGH C3 02:59:57



Monitoring pogody

➤ **Minimum**

- Całkowite promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horyzontalnej
- Temperatura otoczenia

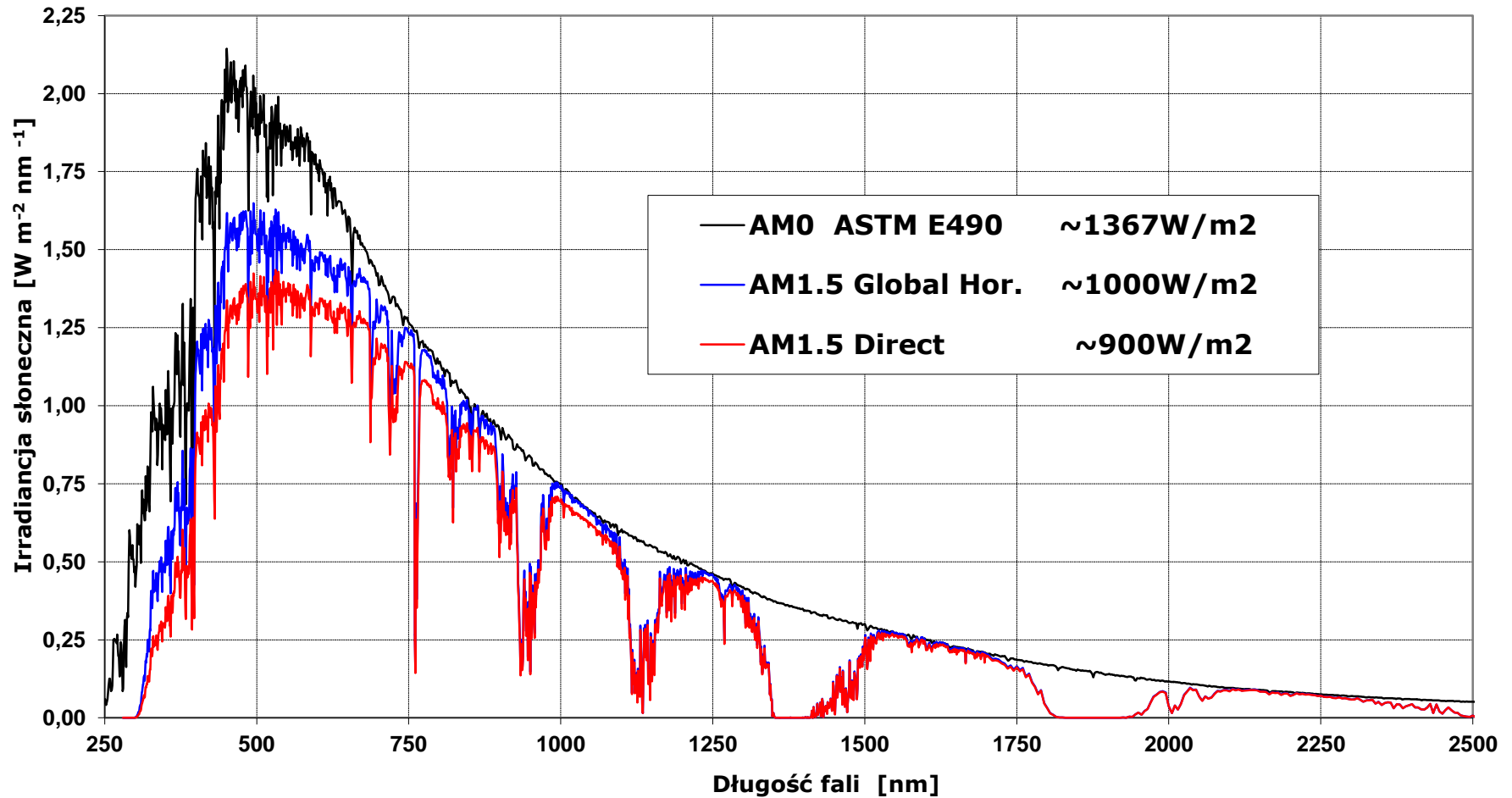
➤ **Optimum**

- Całkowite promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horyzontalnej
- Rozproszone promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horyzontalnej
- Całkowite promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie modułów PV
- Temperatura otoczenia (powietrza)
- Temperatura modułów PV
- Ciśnienie atmosferyczne
- Wilgotność powietrza

Pomiary zwykle co 1 sek. a uśrednianie/rejestrację danych pomiarowych przeprowadza się z krokiem czasowym nie większym niż 1 godzina (można spotkać pliki źródłowe z danymi co 5, 15 lub 30 minut).

Widmo promieniowania słonecznego

ASTM G173-03 Referencyjne spektrum słoneczne ISO 9845-1 1992



Energia słoneczna



Właściwie o jakich ilościach
dostępnej energii
słonecznej mówimy?



Potencjał OZE na Ziemi

Źródło: Wikipedia, Energy flow charts . Global Climate & Energy Project.



0,018%

1,7%

47%

208%

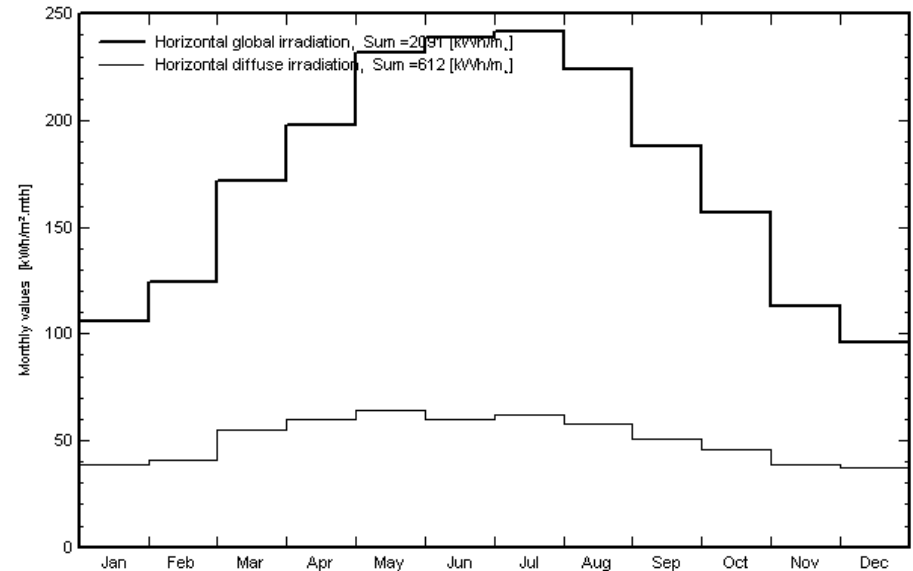
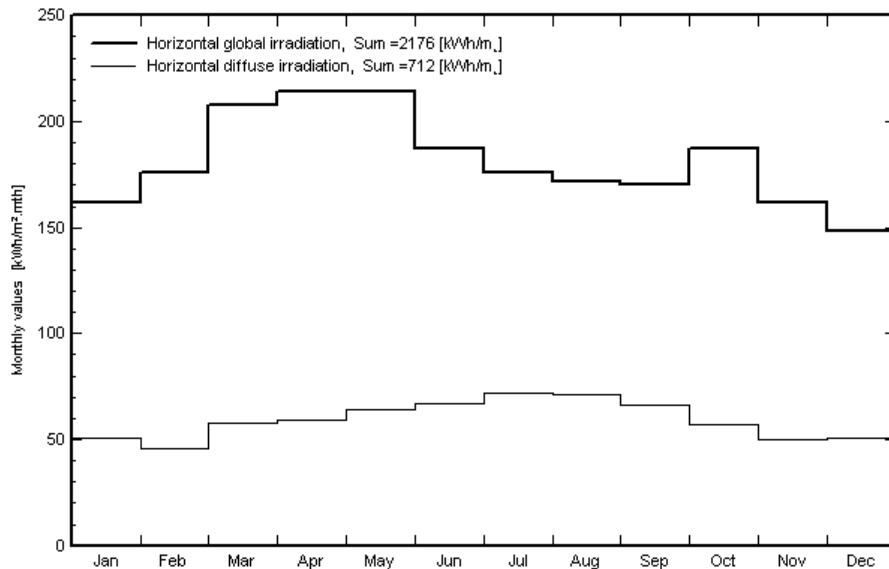
Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

Dakar **2176**

Kair **2091**

Meteo for Dakar, Synthetic data

Meteo for Cairo, Synthetic data

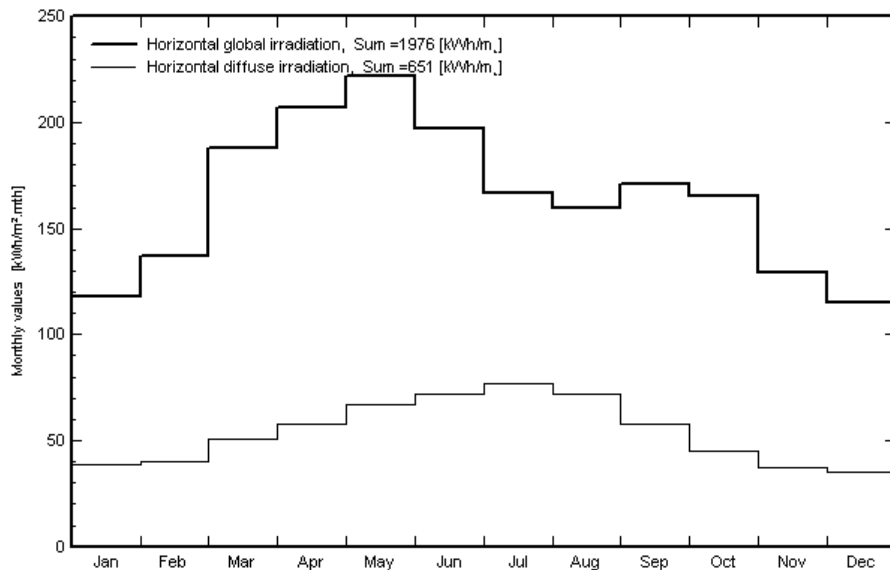


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

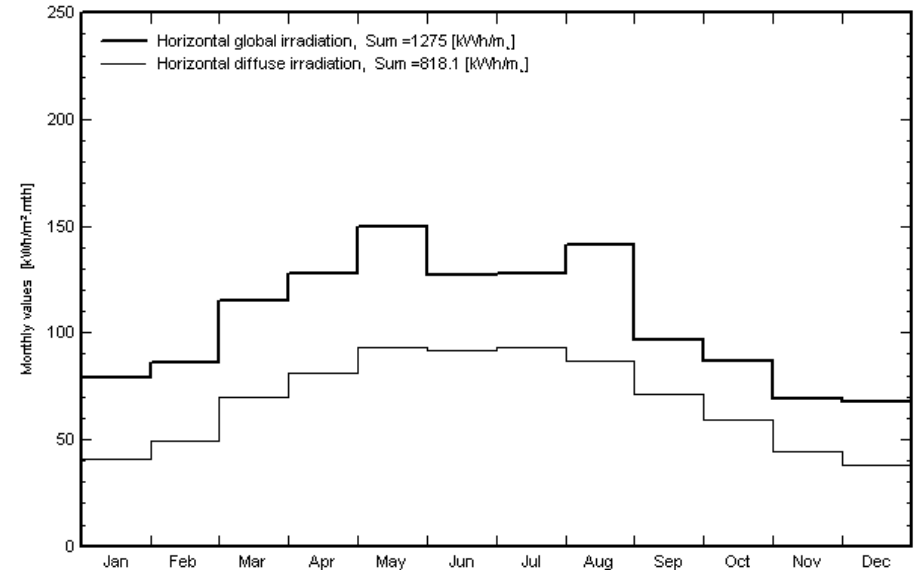
Delhi 1976

Meteo for Delhi, Synthetic data



Tokyo 1275

Meteo for Tokyo, Synthetic data

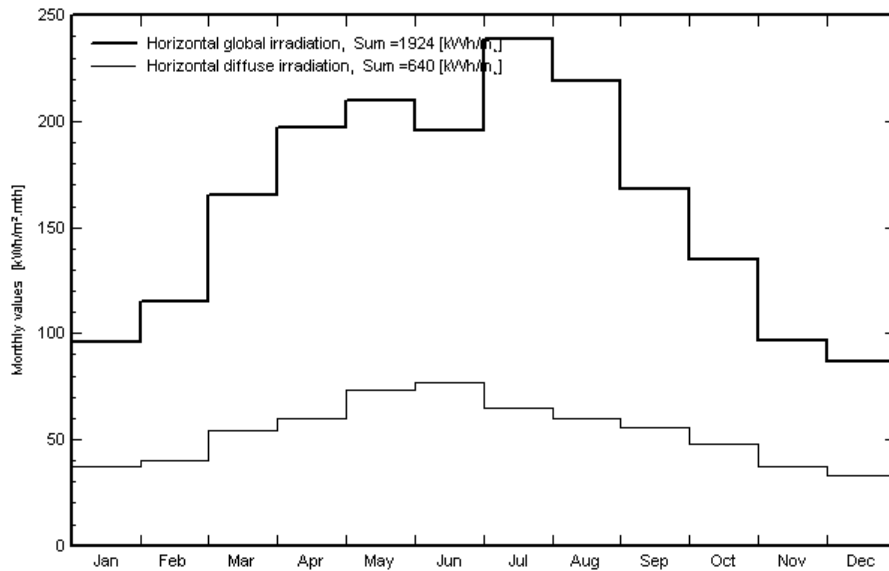


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

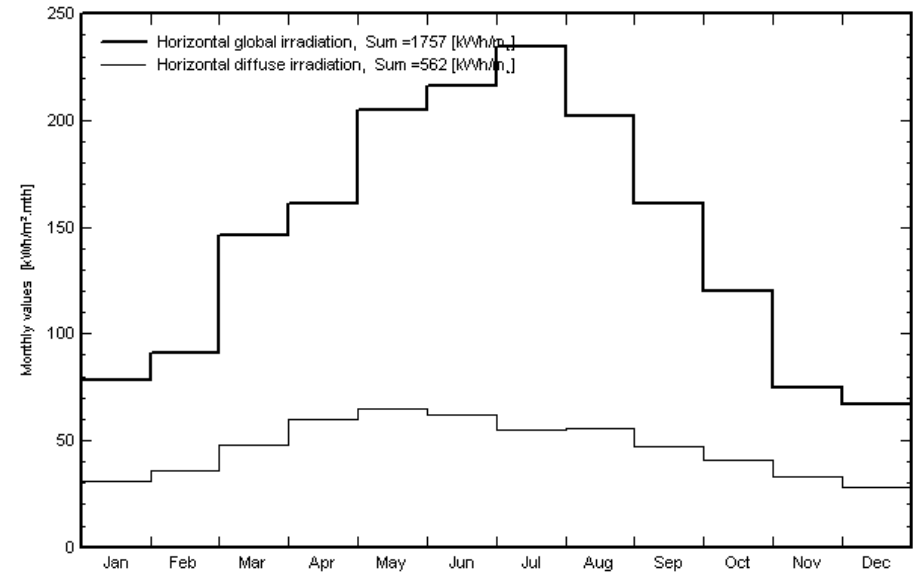
Los Angeles **1924**

Meteo for Los Angeles, Synthetic data



Sevilla **1757**

Meteo for Sevilla, Synthetic data

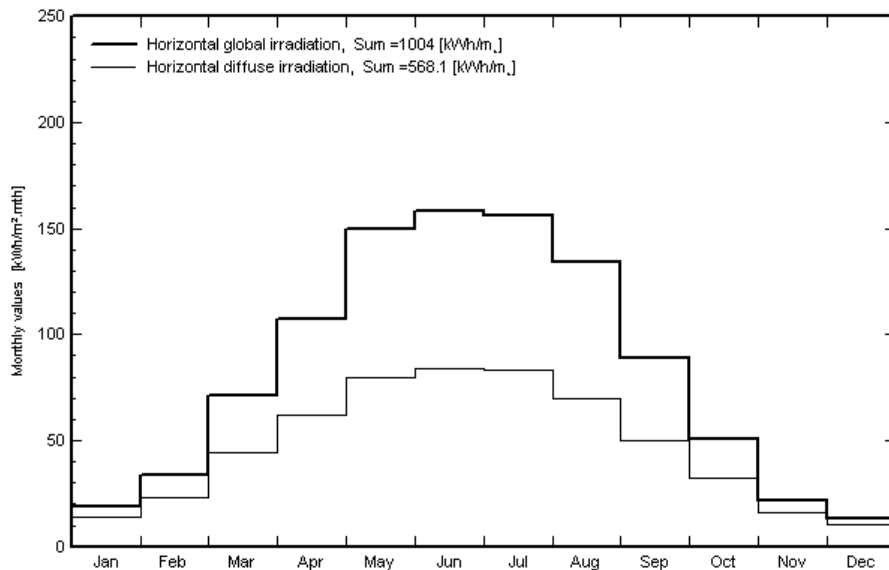


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

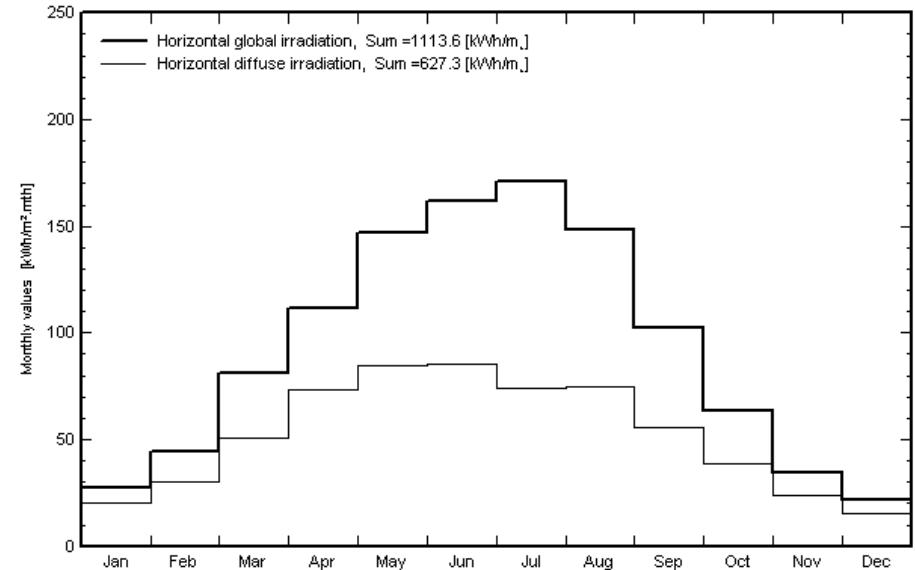
Berlin **1004**

Meteo for Berlin, Synthetic data



Freiburg **1113**

Meteo for Freiburg, Synthetic data

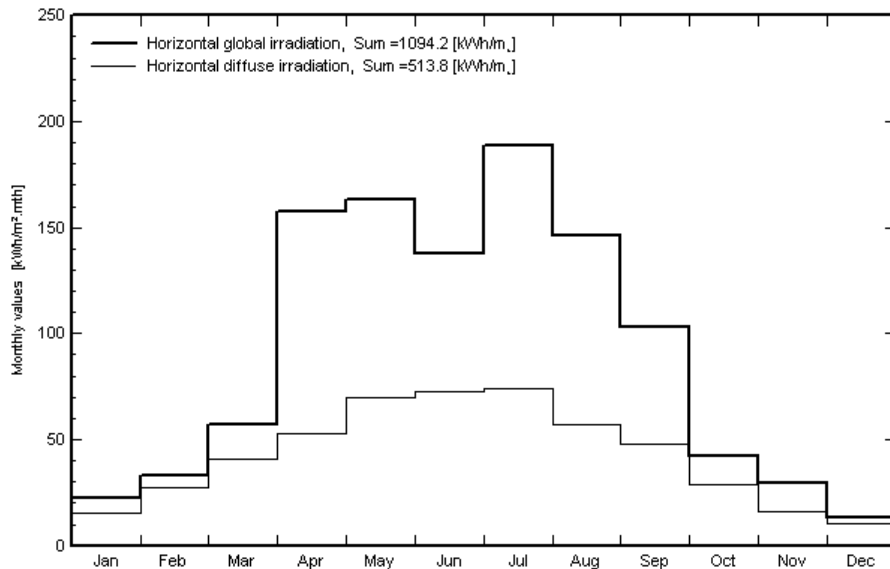


Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Dostępna energia słoneczna [kWh/m²/rok]

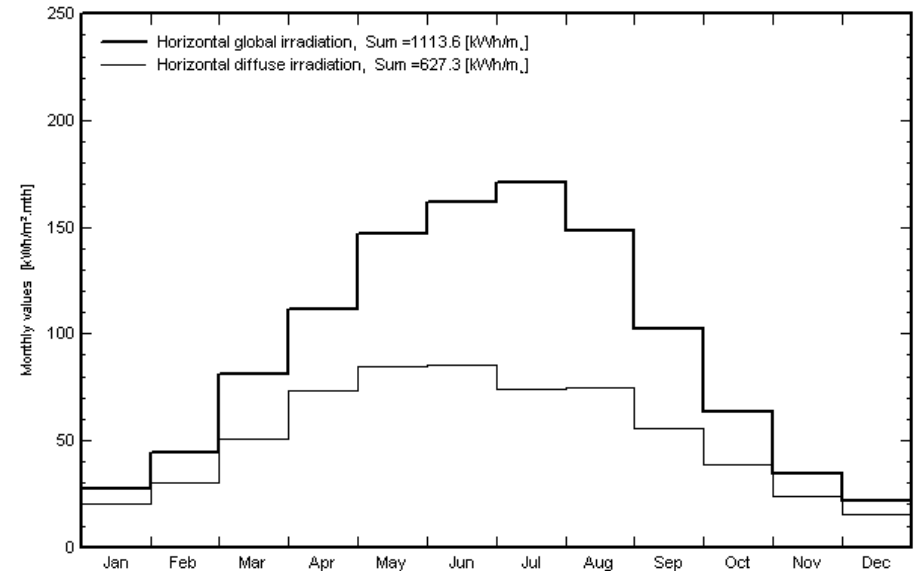
Kraków **1094**

Meteo for Krakow, Data recorded from 01/01/09 to 31/12/09



Freiburg **1113**

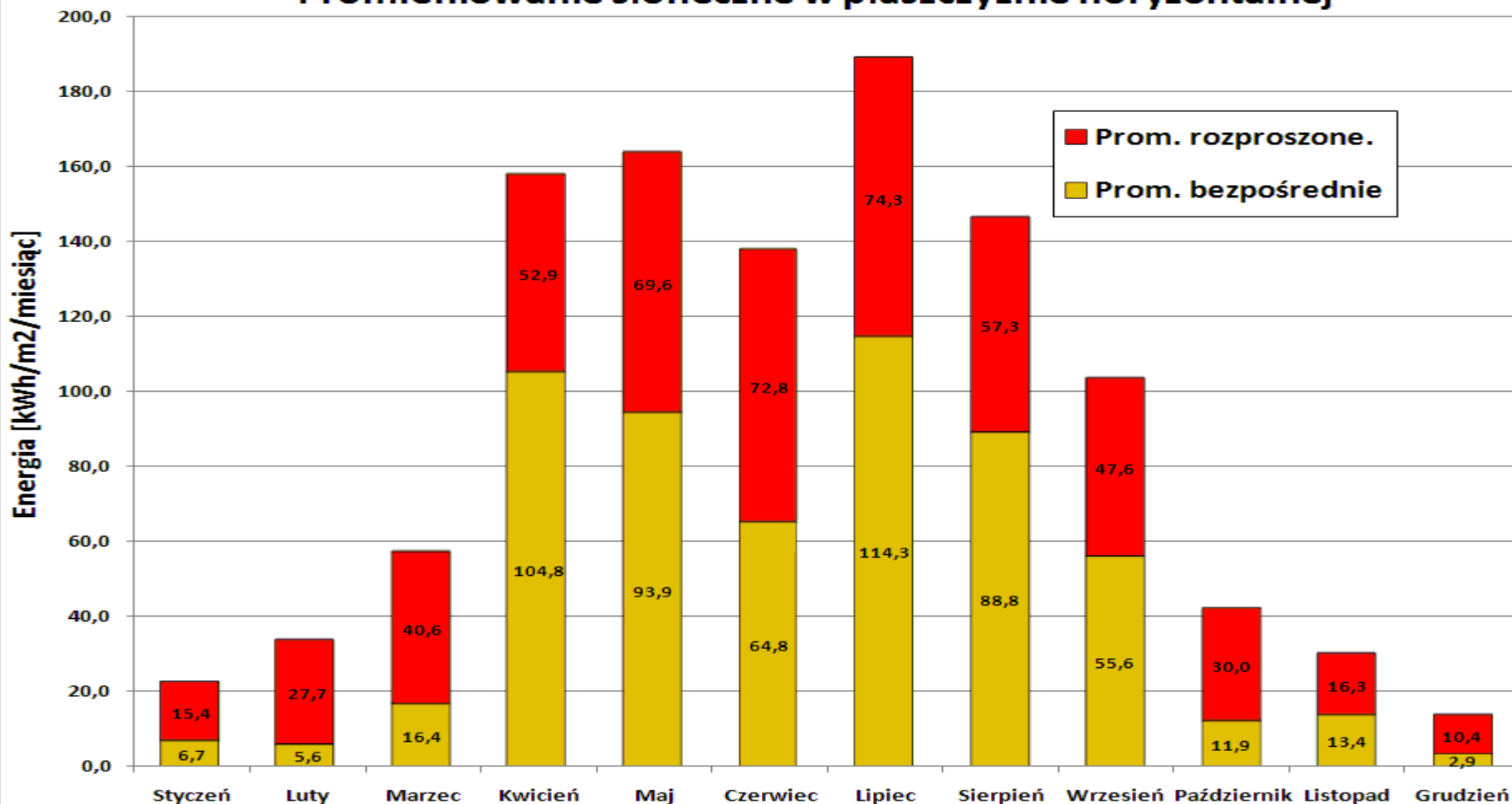
Meteo for Freiburg, Synthetic data



Źródło: PVSyst (Meteonorm)

Struktura promieniowania słonecznego - pomiary

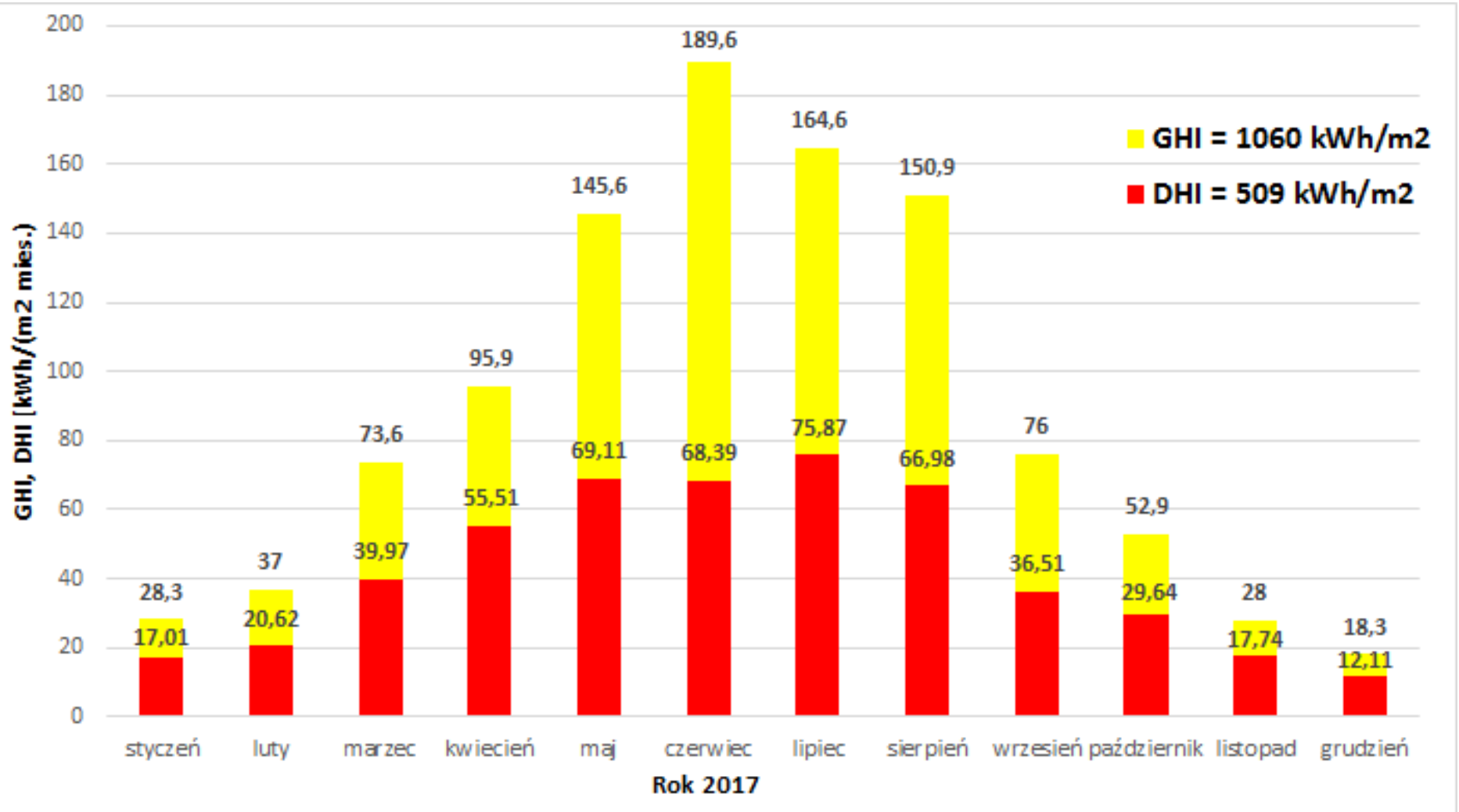
Promieniowanie słoneczne w płaszczyźnie horyzontalnej



Struktura promieniowania słonecznego - Kraków rok 2009

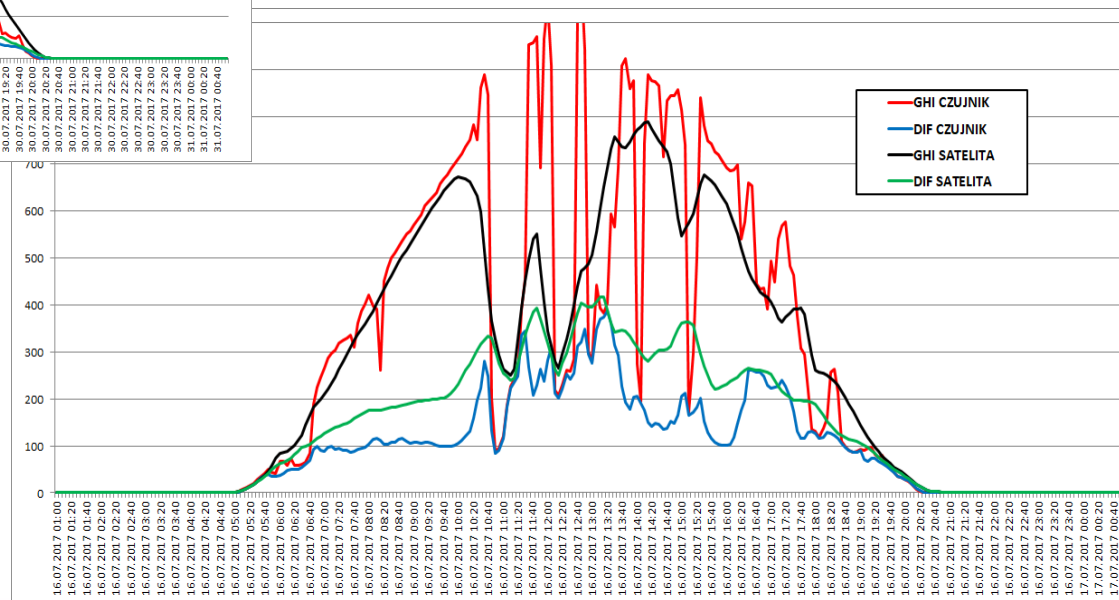
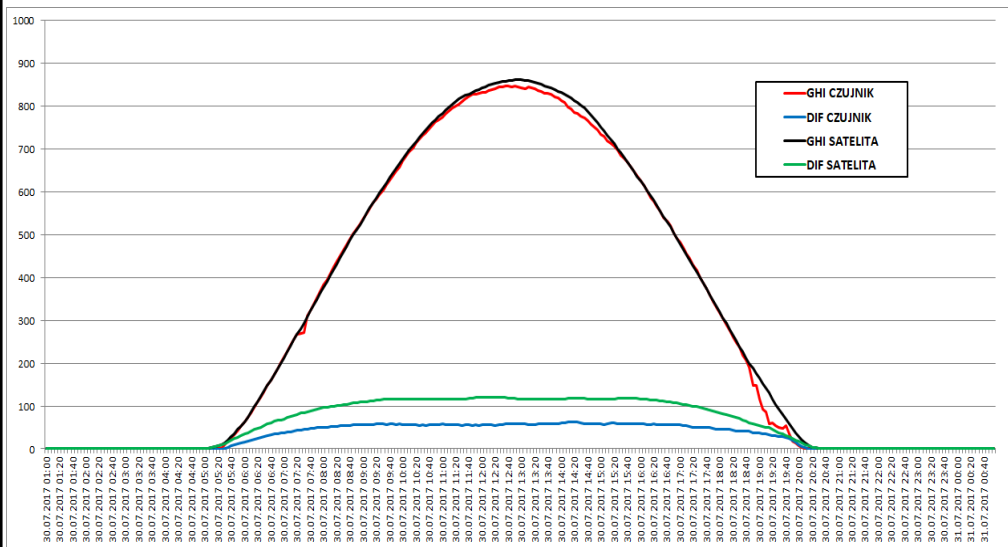
Promieniowanie słoneczne 2017

Kraków AGH, dach pawilonu C-3



Źródła danych o promieniowaniu słonecznym

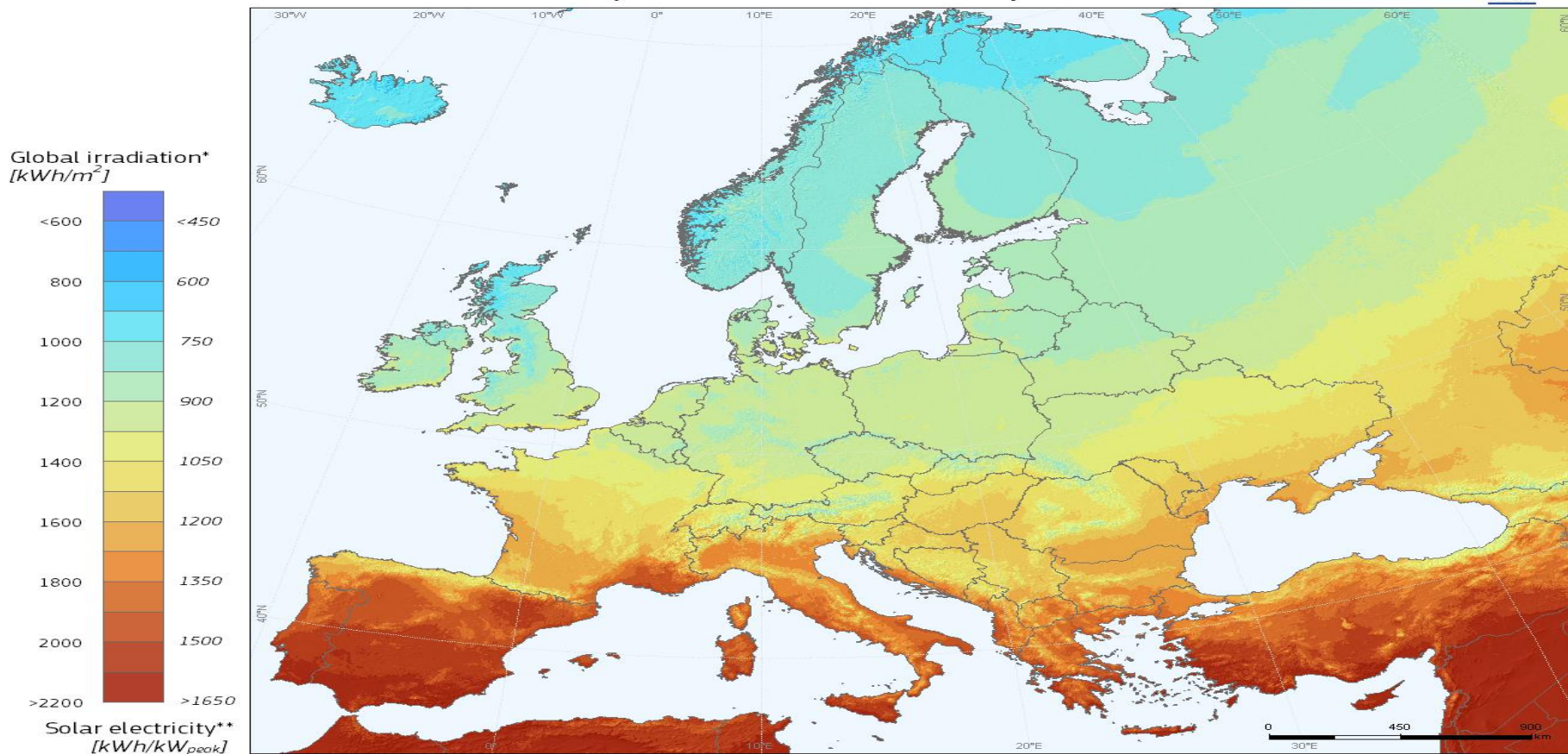
Pomiary naziemne i analizy satelitarne



Potencjał PV w Europie

(energia słoneczna na optymalnie zorientowanej, zafiksowanej płaszczyźnie)

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



* Yearly sum of global irradiation incident on optimally-inclined south-oriented photovoltaic modules

**Yearly sum of solar electricity generated by optimally-inclined 1kW_p system with a performance ratio of 0.75

© European Union, 2012
 PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Authors: Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
 EC - Joint Research Centre
 In collaboration with: CM SAF, www.cmsafeu

Legal notice: Neither the European Commission nor any person acting on behalf of the Commission is responsible for the use which might be made of this publication.

Rzeczywista sprawność systemów PV

współczynnik Performance Ratio (PR)

Performance Ratio Development for PV Systems

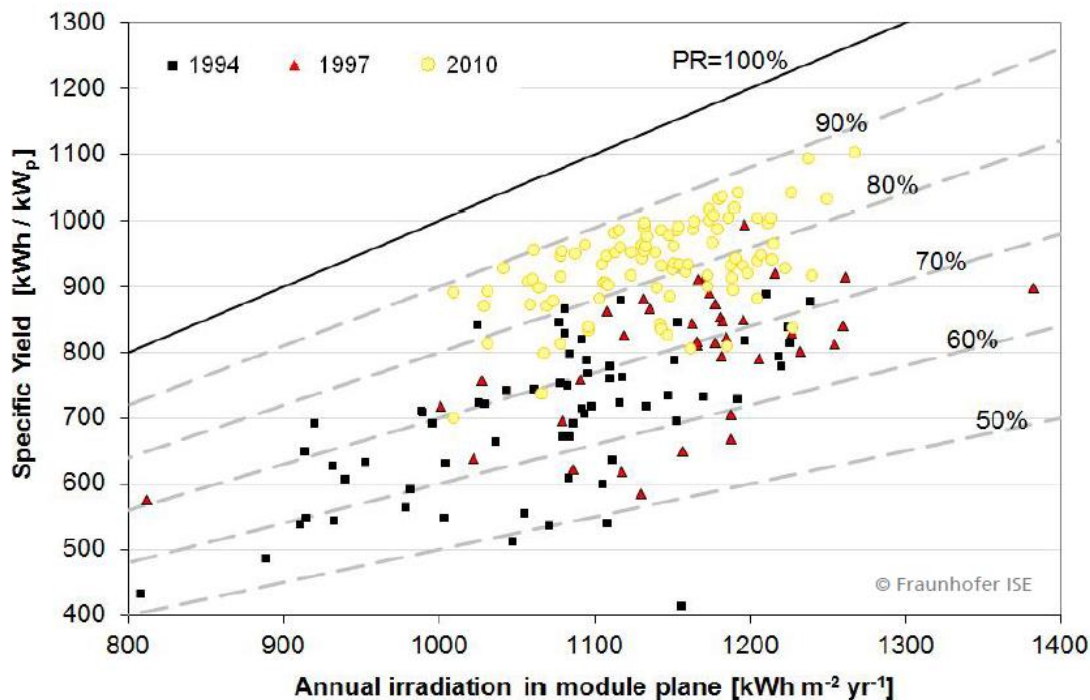
Germany

In the 1990's

- Typical PR ~70 %
- Widely ranging PR values

Today

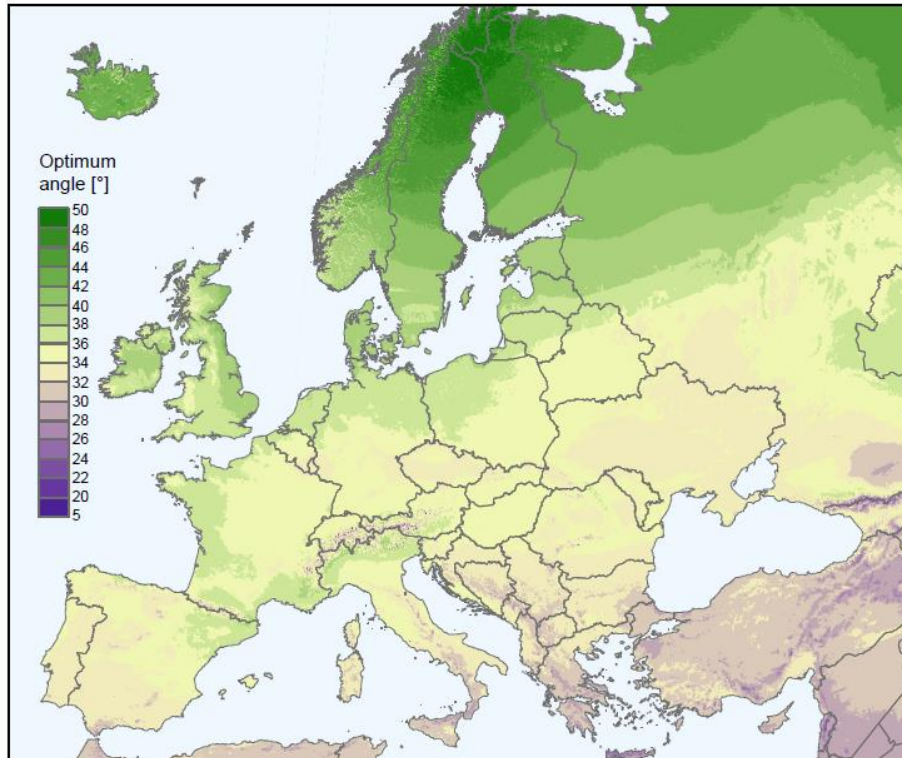
- Typical PR ~80-90 %
- Less variance in PR as compared to 1990's



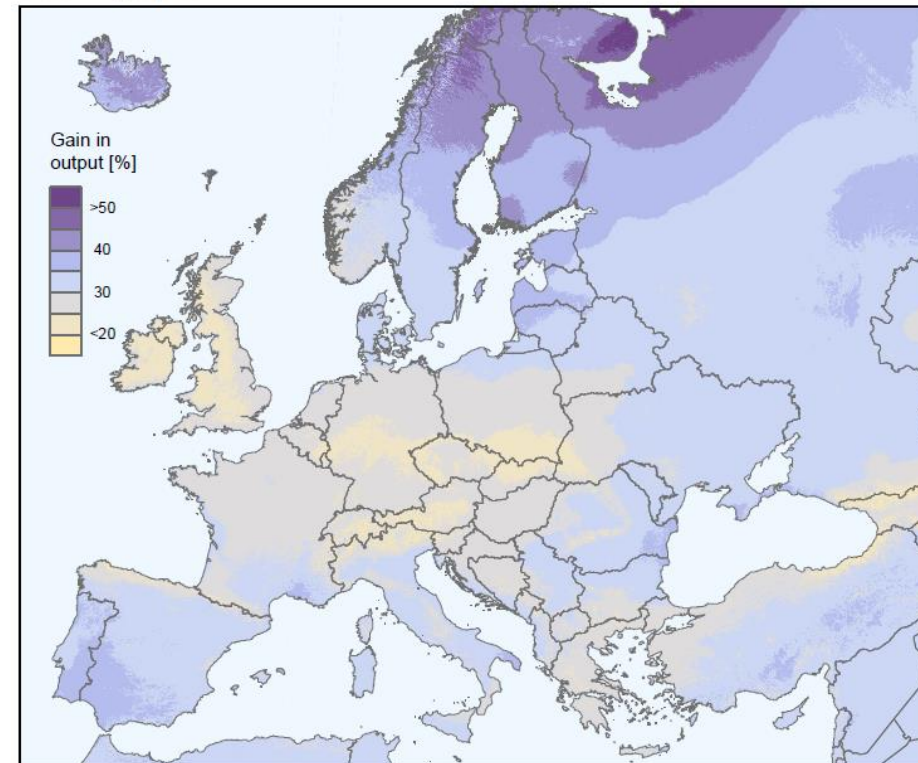
Source: Fraunhofer ISE "1000 Dächer Jahresbericht" 1994 and 1997; 2011 system evaluation

Potencjał PV w Europie

Optimum inclination of PV modules to maximize yearly energy yield



PV output: difference between fixed optimum angle and one-axis tracking system



© European Union, 2012

PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

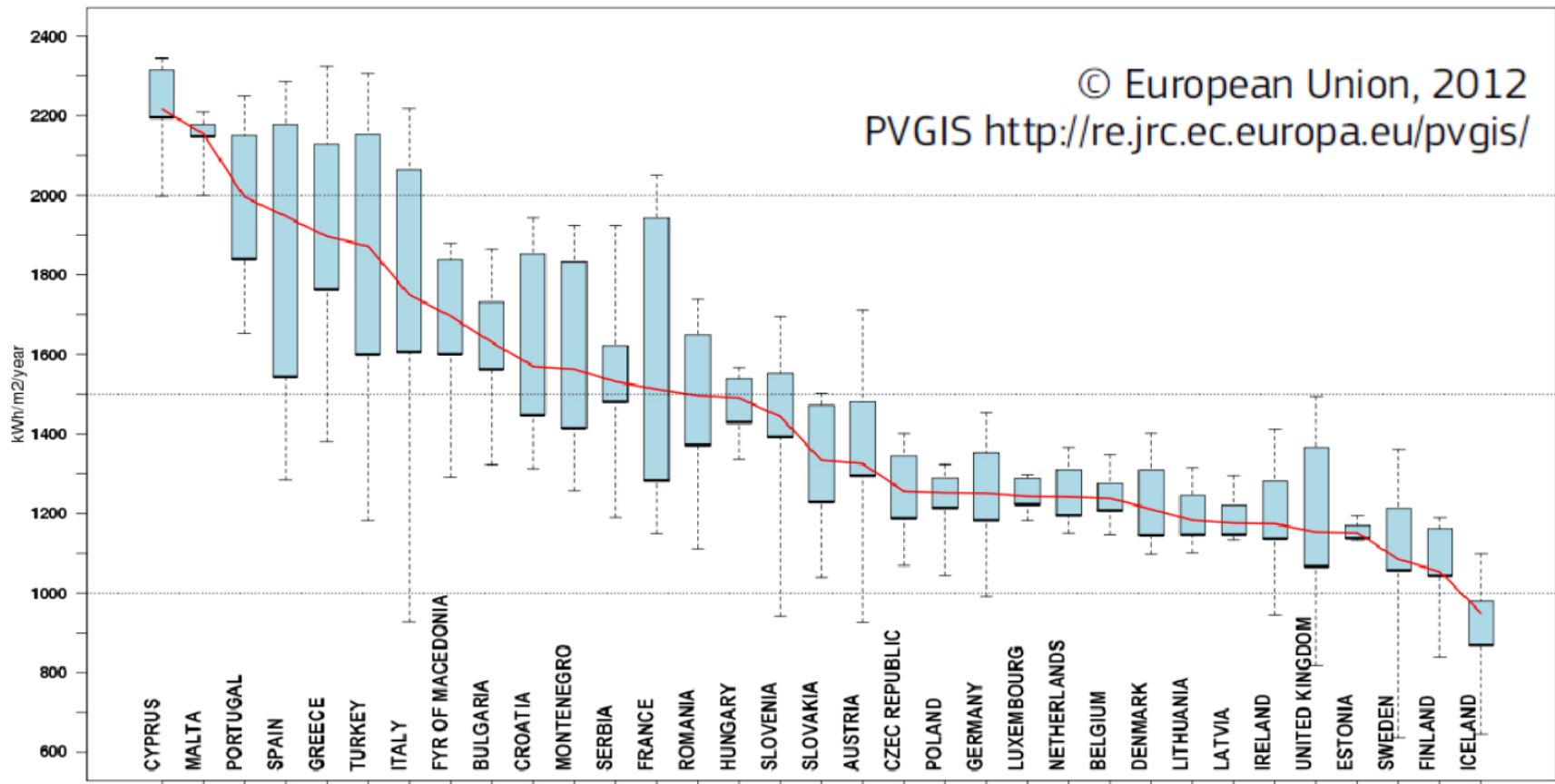
Authors:

Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
 European Commission • Joint Research Centre
 Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit
 TP 450 I-21027 Ispra (VA) Italy

In collaboration with:



Potencjał energii słonecznej na optymalnie pochylonej powierzchni w warunkach miejskich



Data description:

The PVGIS database has been developed from solar radiation data estimated from satellite using the CMSAF models (www.cmsaf.eu), representing the period 1996-2011. In areas north of 58 °N the data are derived from ground stations measurements collected within the European Solar Radiation Atlas and interpolated spatially. For more details, see: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/mapinfo.htm>
Grid resolution (enhanced by terrain) : 1km x 1km
Map projection : Lambert Azimutal Equal Area, WGS84, lat 52° lon 10°

Authors:

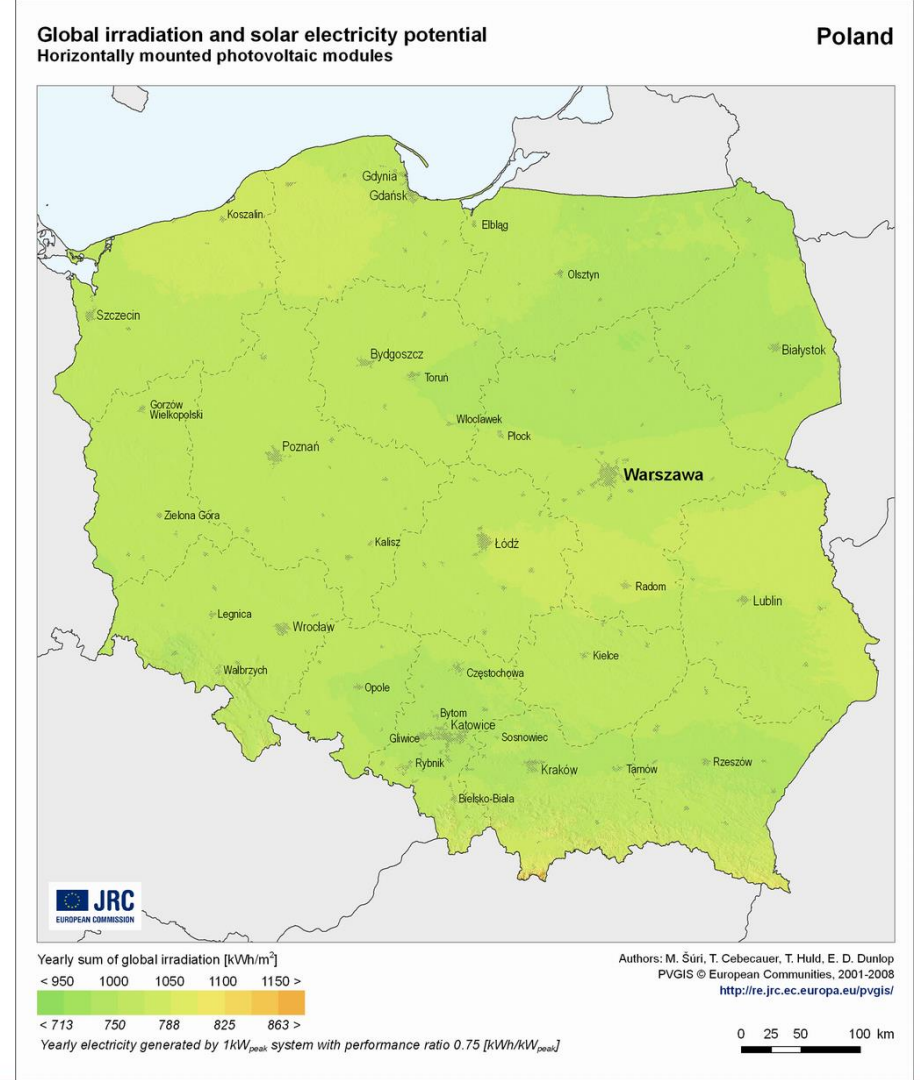
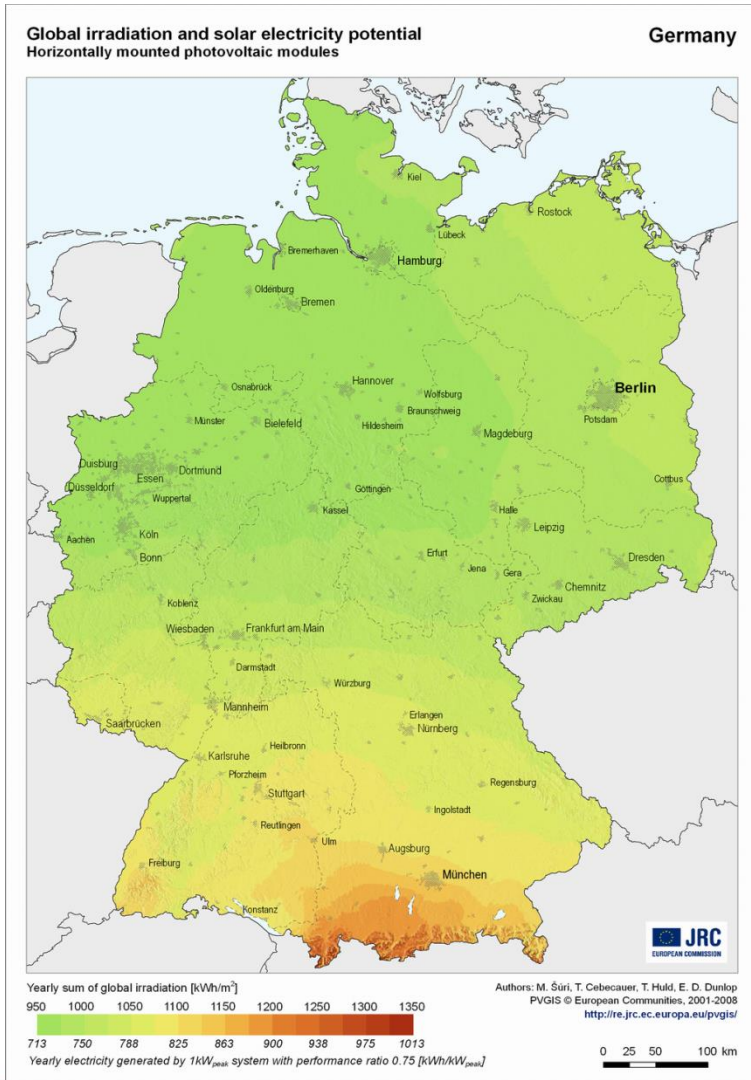
Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
European Commission • Joint Research Centre
Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit
TP 450 I-21027 Ispra (VA) Italy

In collaboration with:



Climate Monitoring
www.cmsaf.eu

Nasłonecznienie w Niemczech i w Polsce



Potencjał produkcji energii z PV w Niemczech i w Polsce

Global irradiation and solar electricity potential
Optimally-inclined photovoltaic modules
Germany

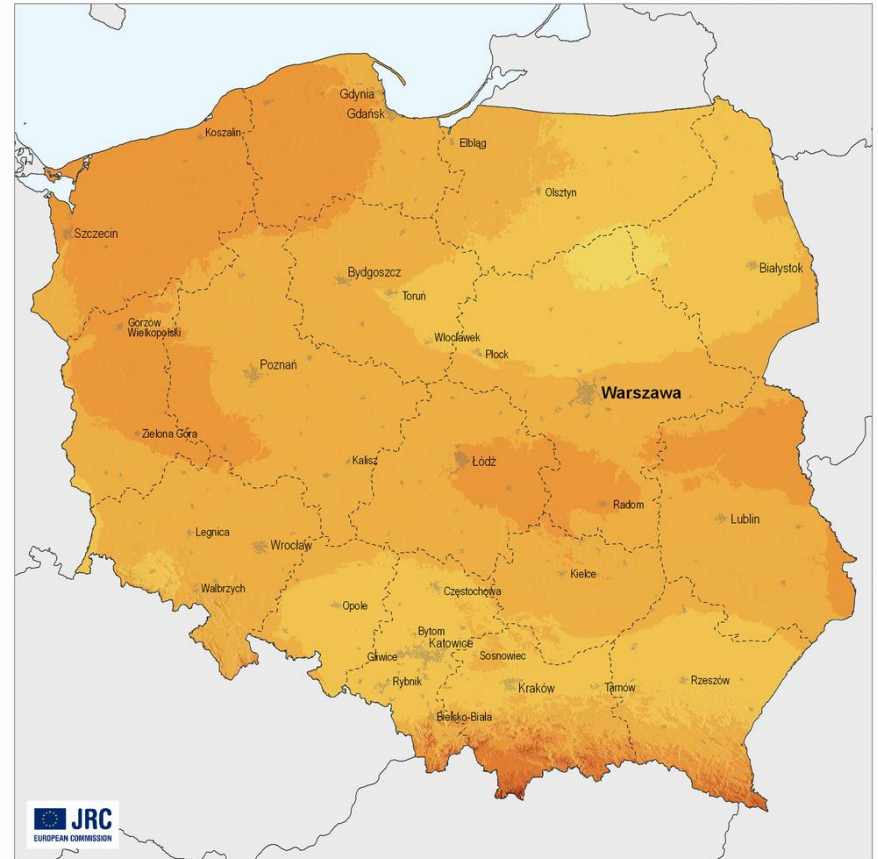


Yearly sum of global irradiation [kWh/m²]
 < 1100 1150 1200 1250 1300 1350 1400 >
 < 825 863 900 938 975 1013 1050 >
 Yearly electricity generated by 1kW_{peak} system with performance ratio 0.75 [kWh/kW_{peak}]

Authors: M. Šúri, T. Cebebauer, T. Huld, E. D. Dunlop
 PVGIS © European Communities, 2001-2008
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

0 25 50 100 km

Global irradiation and solar electricity potential
Optimally-inclined photovoltaic modules
Poland



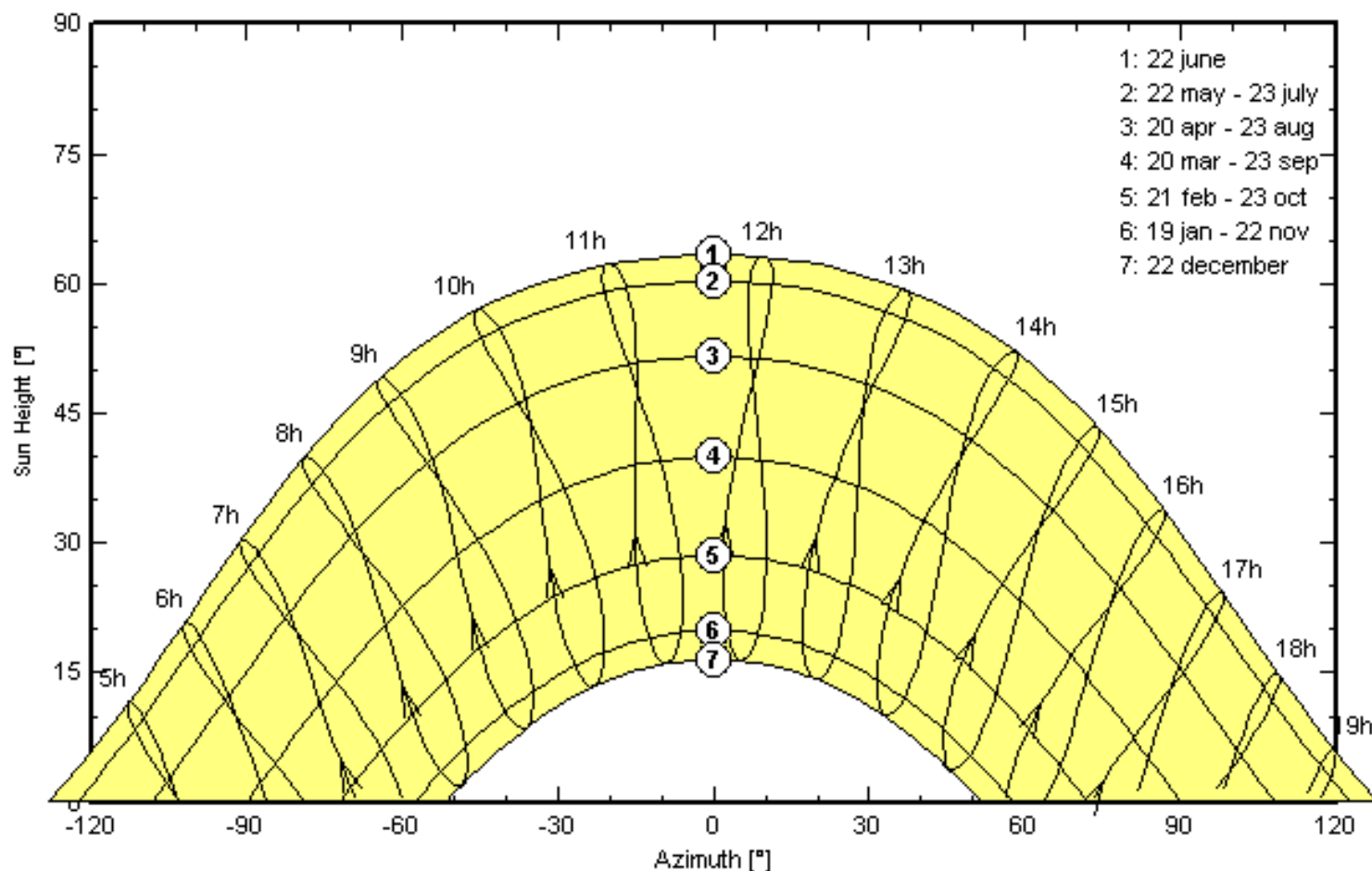
Yearly sum of global irradiation [kWh/m²]
 < 1100 1150 1200 1250 1300 >
 < 825 863 900 938 975 >
 Yearly electricity generated by 1kW_{peak} system with performance ratio 0.75 [kWh/kW_{peak}]

Authors: M. Šúri, T. Cebebauer, T. Huld, E. D. Dunlop
 PVGIS © European Communities, 2001-2008
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

0 25 50 100 km

Trajektorie słoneczne widziane z Krakowa

Solar paths at Krakow, (Lat. 50.1°N, long. 20.1°E, alt. 214 m)



Wpływ montażu paneli PV na dostępność energii słonecznej

Transposition Factors for Krakow (Poland)

Period : Whole year --- Horizontal Global Irrad. = 1044 kWh/m₂

Azimuth	-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Tilt													
90°	0.61	0.65	0.70	0.73	0.75	0.76	0.76	0.76	0.75	0.73	0.70	0.66	0.61
80°	0.67	0.73	0.78	0.82	0.85	0.86	0.87	0.86	0.85	0.82	0.79	0.74	0.68
70°	0.74	0.80	0.85	0.90	0.93	0.95	0.95	0.95	0.93	0.90	0.86	0.81	0.75
60°	0.80	0.86	0.92	0.96	1.00	1.02	1.03	1.02	1.00	0.97	0.92	0.87	0.81
50°	0.85	0.91	0.97	1.01	1.05	1.07	1.08	1.07	1.05	1.02	0.97	0.92	0.86
40°	0.90	0.96	1.01	1.05	1.08	1.10	1.11	1.10	1.08	1.05	1.01	0.96	0.90
30°	0.94	0.99	1.03	1.06	1.09	1.11	1.11	1.11	1.09	1.07	1.03	0.99	0.94
20°	0.97	1.00	1.03	1.06	1.08	1.09	1.10	1.09	1.08	1.06	1.04	1.01	0.97
10°	0.99	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06	1.06	1.06	1.05	1.04	1.03	1.01	0.99
0°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tracking planes :

Tracking two axes :

TF = 1.38 (124 % of fixed plane's optimum)

East-West horizontal axis :

TF = 1.17 (105 % of fixed plane's optimum)

N-S axis, Tilt = Lat. - 10° :

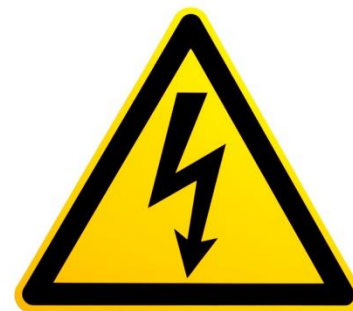
TF = 1.35 (121 % of fixed plane's optimum)

N-S axis, Tilt = Latitude :

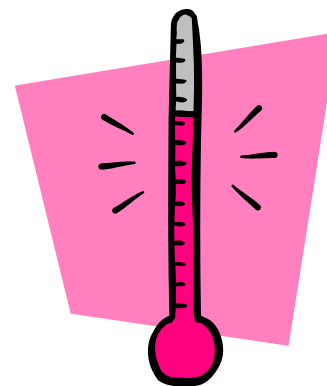
TF = 1.33 (120 % of fixed plane's optimum)

Sposoby przetwarzania energii słonecznej

Moduł fotowoltaiczny (bateria słoneczna)

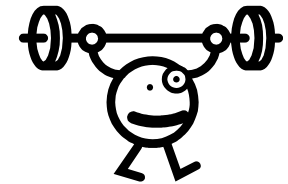


Kolektor słoneczny



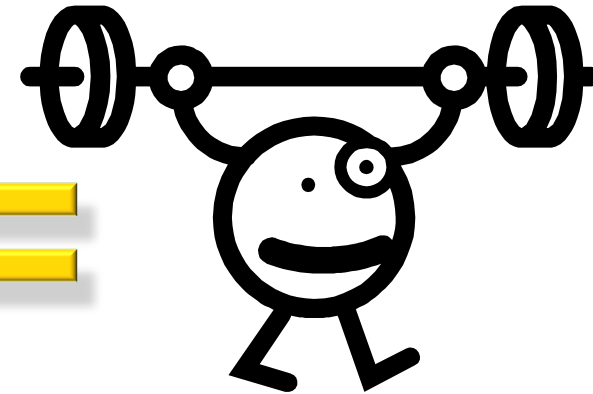
Sprawność przetwarzania energii słonecznej

Moduł fotowoltaiczny (bateria słoneczna)



~20 %

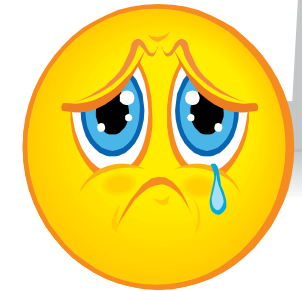
Kolektor słoneczny



do 80 %

Wrażliwość na wzrost temperatury

Moduł fotowoltaiczny (bateria słoneczna)

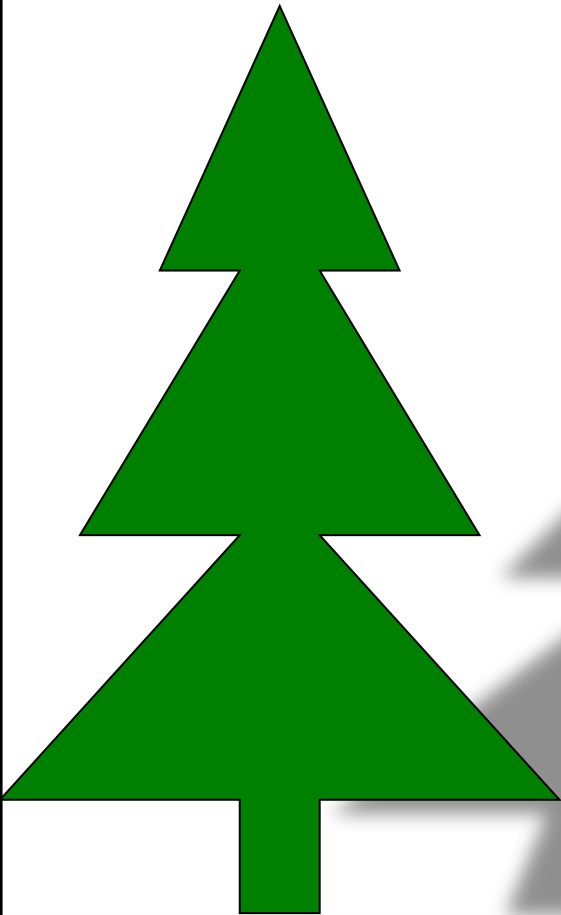


Kolektor słoneczny



Wrażliwość na zacinienie (nawet częściowe)

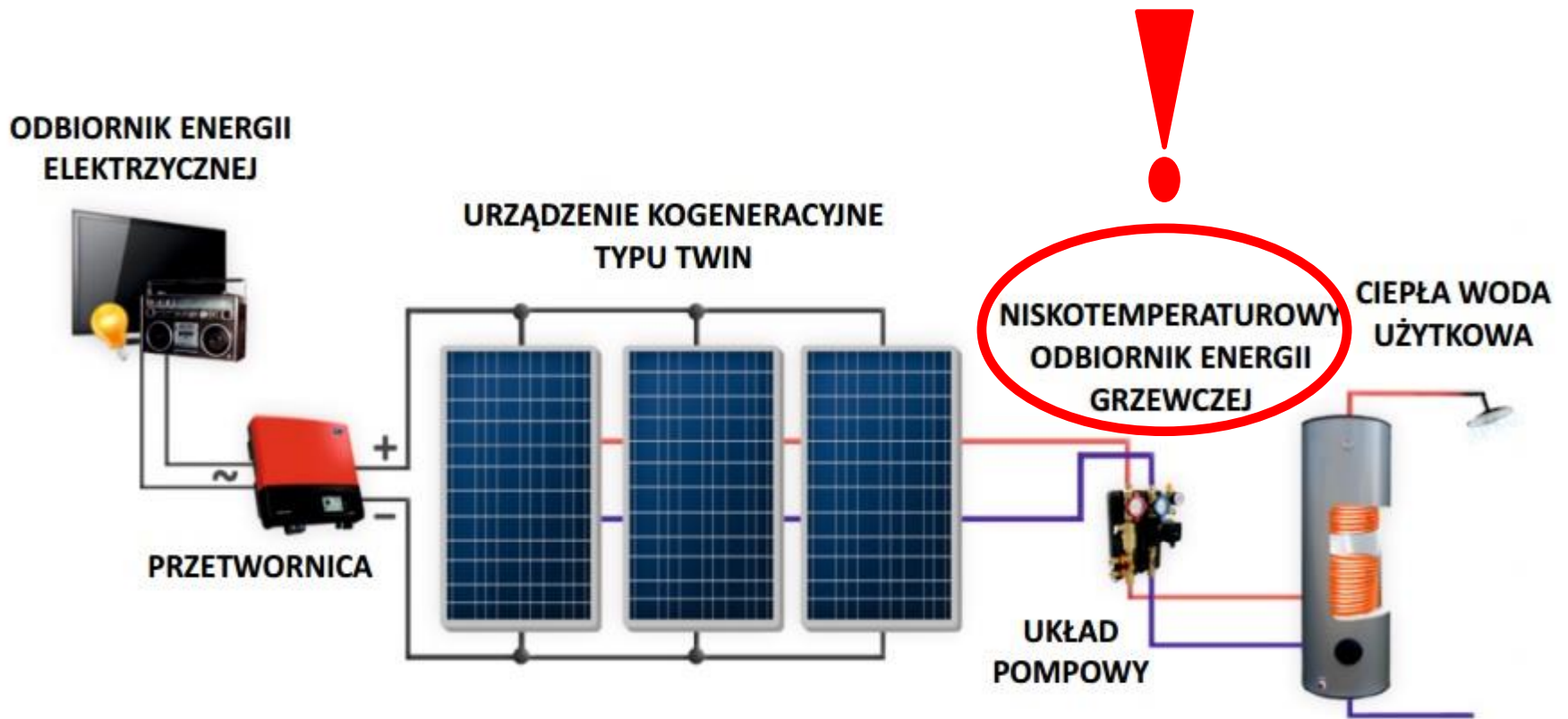
Moduł fotowoltaiczny (bateria słoneczna)



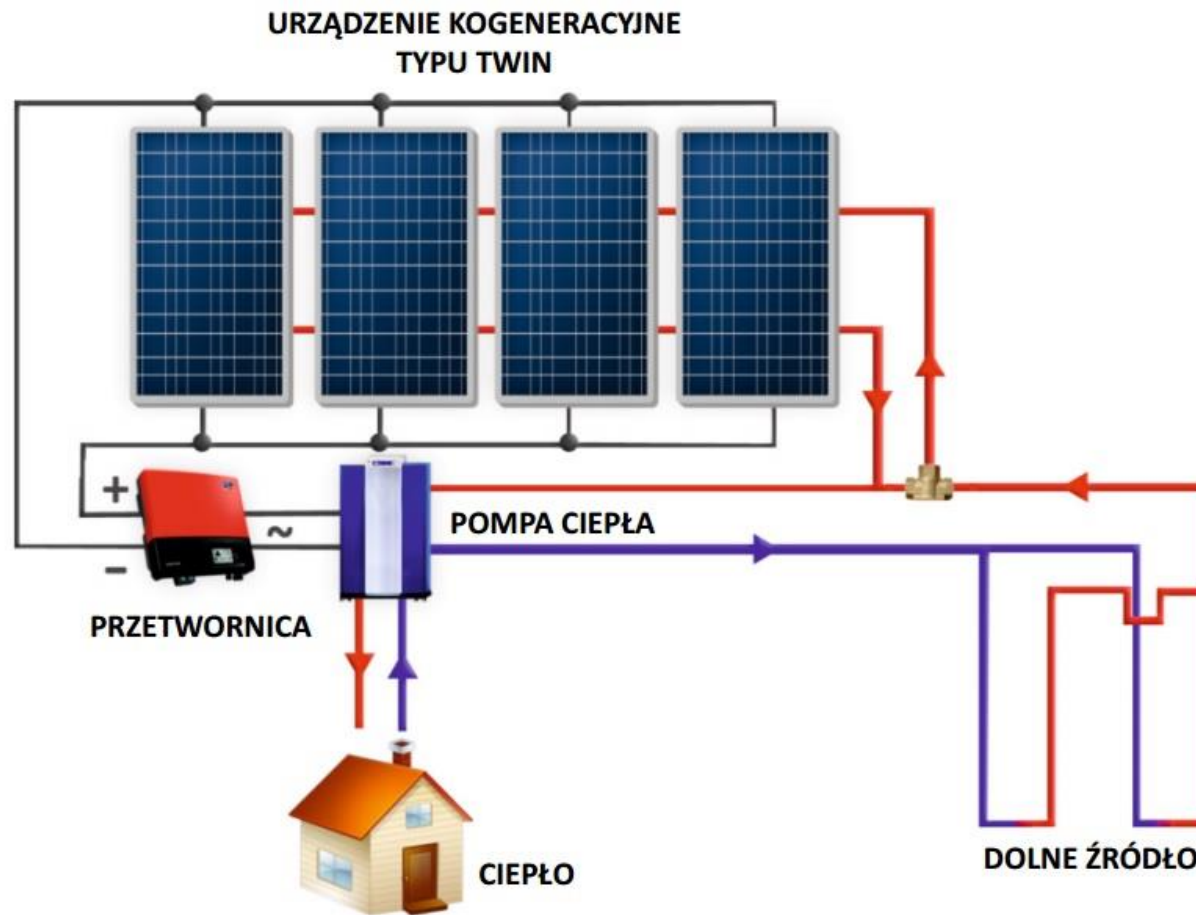
Moduł TWIN (PV + Termo)



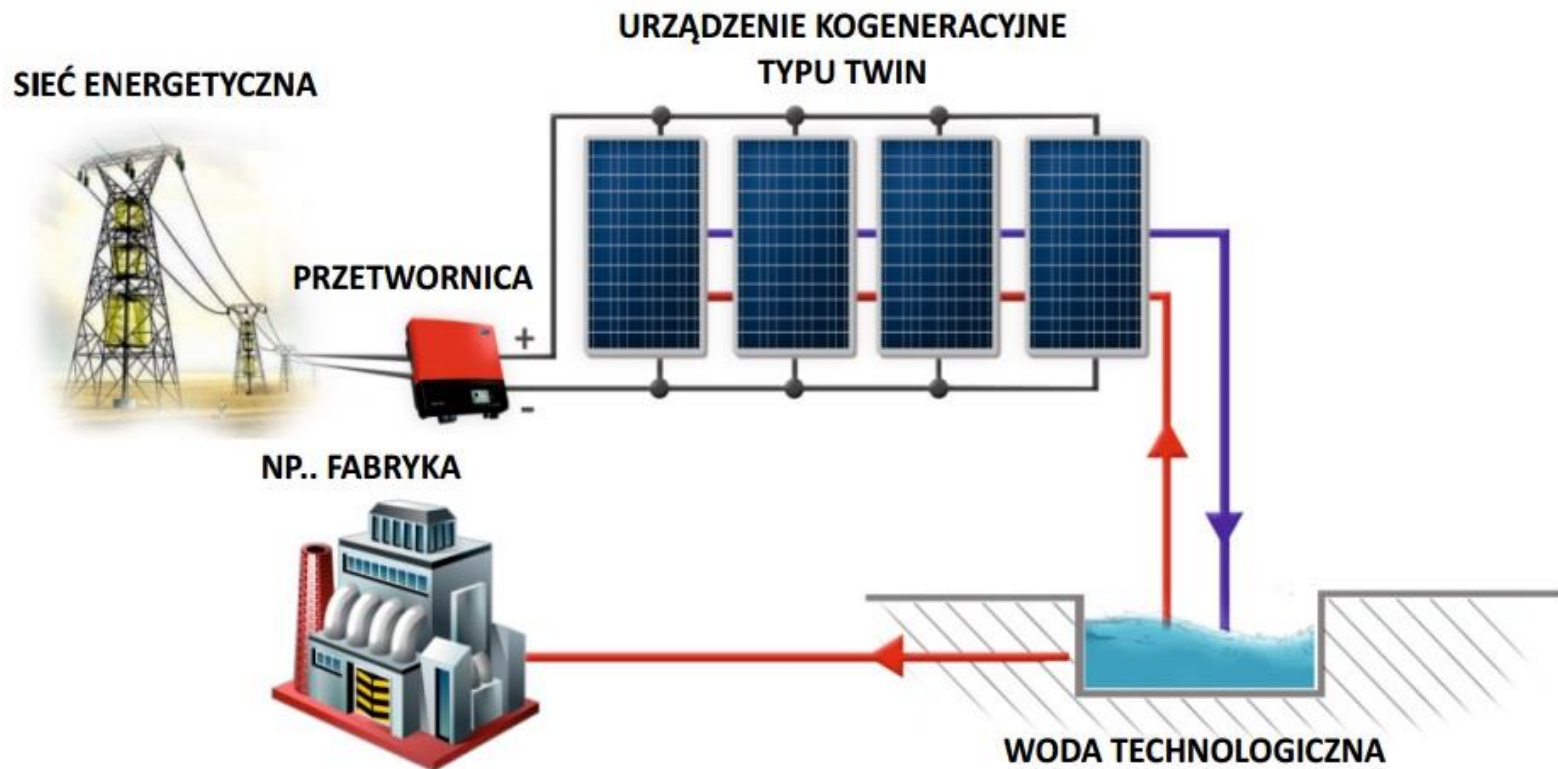
Moduł TWIN (PV + Termo)



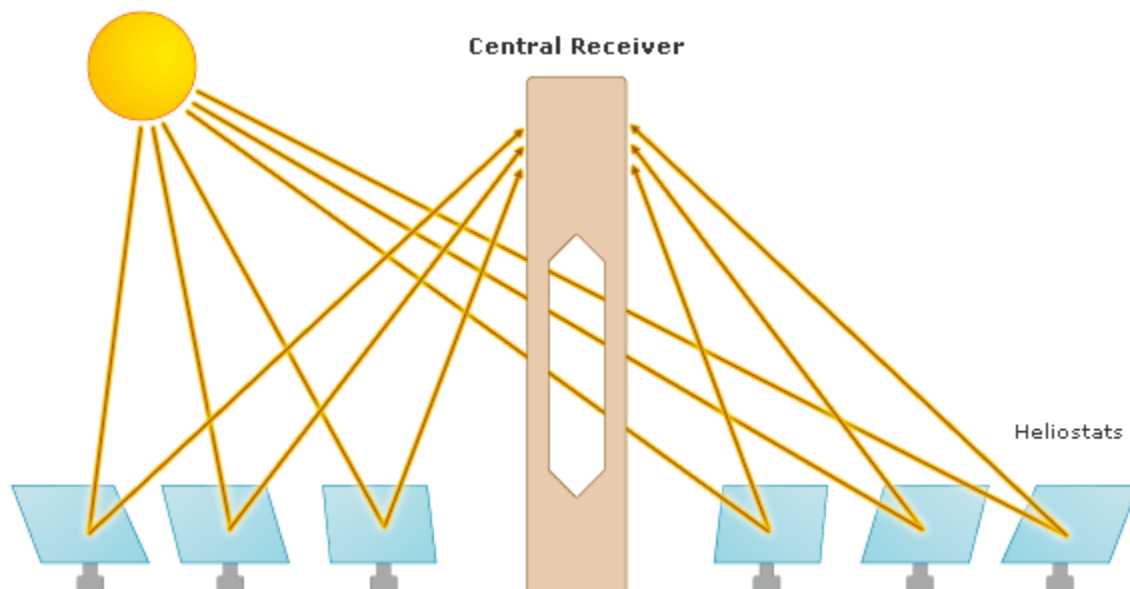
Moduł TWIN (PV + Termo)



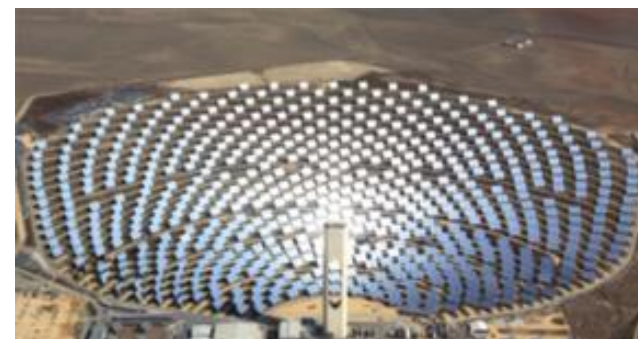
Moduł TWIN (PV + Termo)



Solarna elektrownia termiczna



PS10 (11 MWe)
Solucar – Sevilla, Hiszpania
624 heliostaty po 120m² każdy
wieża 115 m

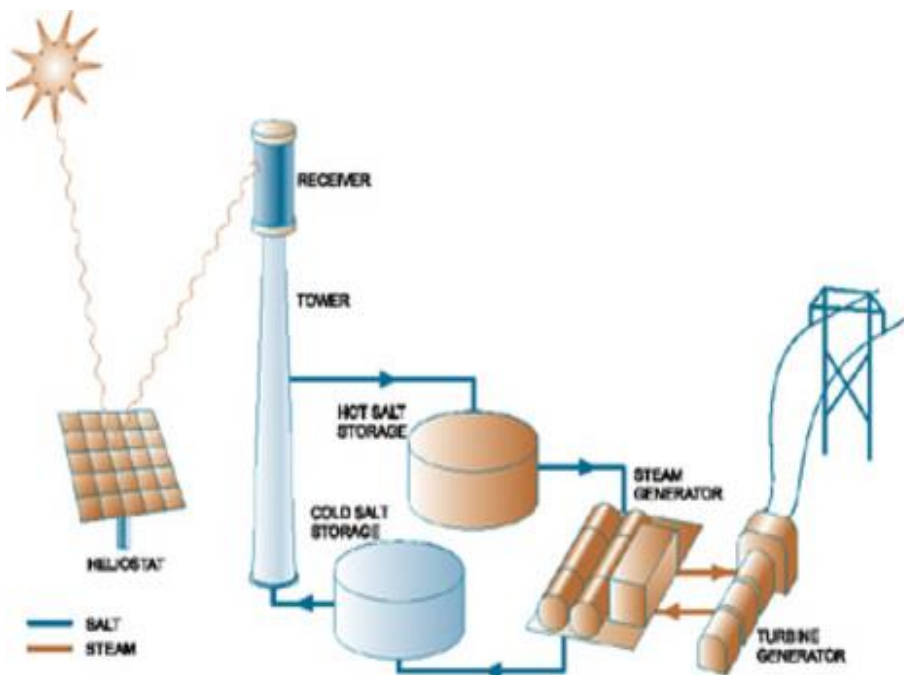


PS20 (20 MWe)
Solucar – Sevilla, Hiszpania
1255 heliostatów po 120m² każdy
wieża 165 m

Źródło: <http://www.abengoasolar.es>

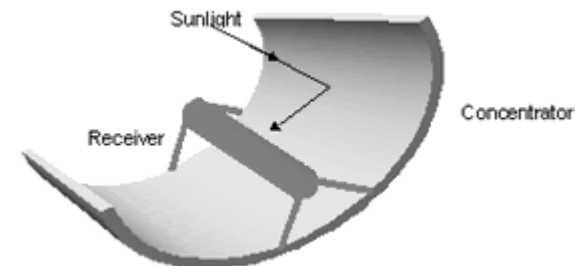
Solarna elektrownia termiczna (schemat)

Zdolność magazynowania pary wodnej na 30 minut pracy elektrowni



Źródło: <http://www.abengoasolar.es>

Solarna elektrownia termiczna



Źródło: <http://www.abengoasolar.es>

Solarna elektrownia Solucar (Sevilla , Hiszpania)



Google Earth

© 2020 Google

Solarna elektrownia termiczna + PV



**Pustynia Atacama
Comuna de María Elena,
Antofagasta Region, Chile**

**Atacama 1 – w trakcie budowy
110 MWe – wieża + heliostaty
100 MW - fotowoltaika**

Magazyn energii na 17,5 godziny

Źródło: <http://www.abengoasolar.es>

Fotowoltaika – co to jest?



Zjawisko fotowoltaiczne
(wewnętrzny efekt
fotowoltaiczny) to wytwarzanie w
ciele stałym **siły**
elektromotorycznej (napięcia)
pod wpływem **promieniowania**
światlnego

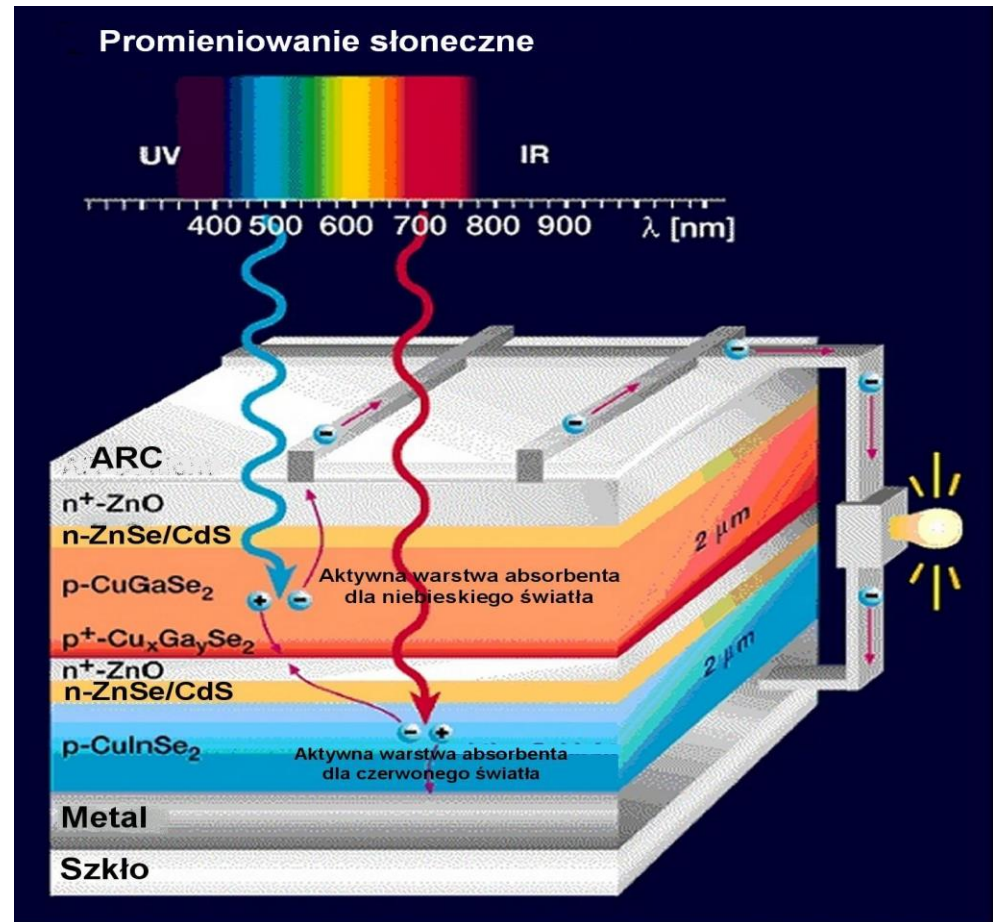
Antoni C. **Becquerel**
(1839)



źródło: wikipedia

Ogniwo fotowoltaiczne

- Oświetlone złącze półprzewodnikowe
- generujące energię w oparciu o wewnętrzne zjawisko fotowoltaiczne
- (generacja pary elektron-dziura gdy energia fotonu jest większa od szerokości pasma zabronionego)
- $\lambda_{\max} = hc/W_g$



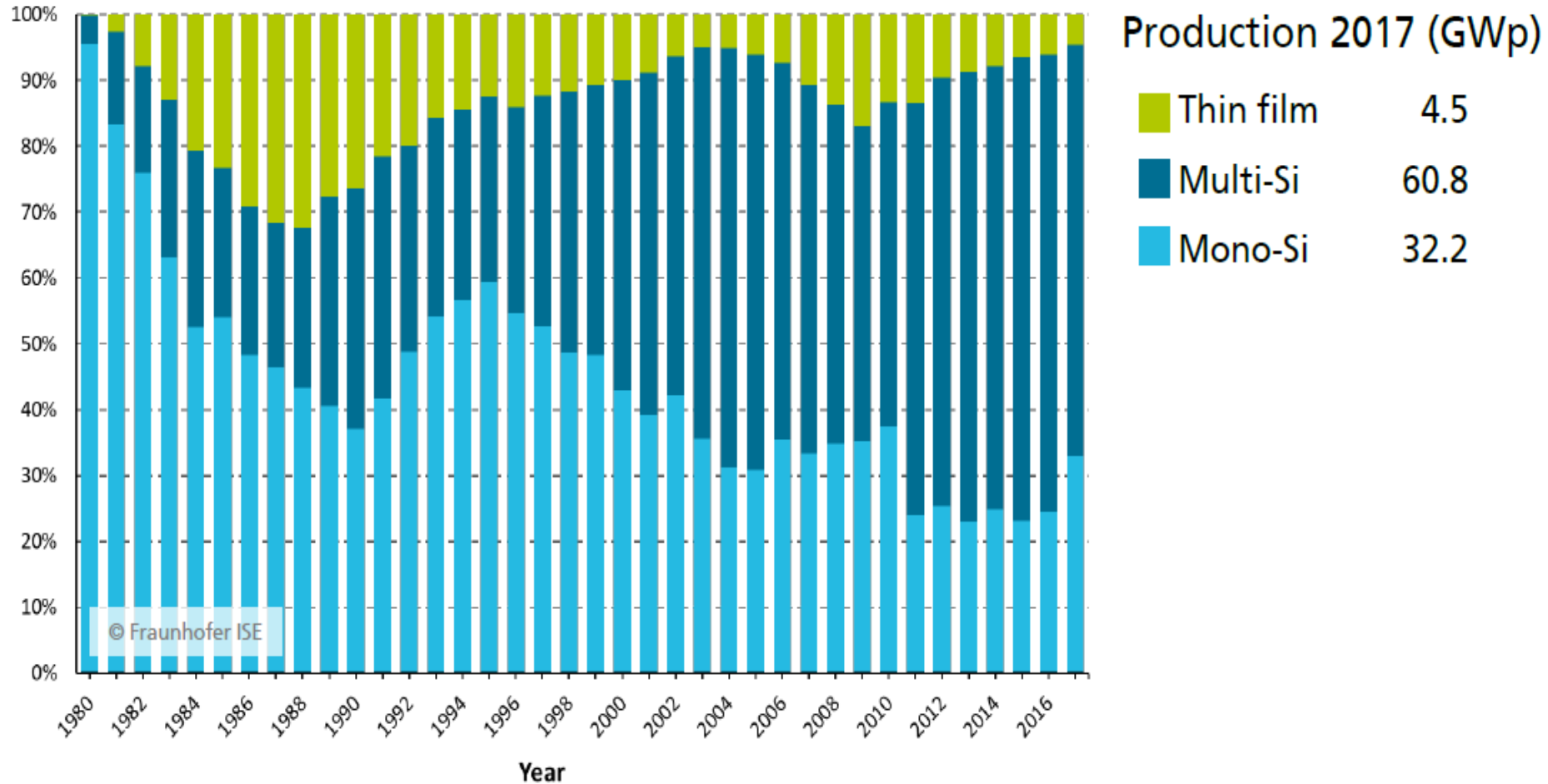
Ogniwo fotowoltaiczne materiały

- Krzem
 - Monokrystaliczny
 - Multikrystaliczny
 - Cienkowarstwowy (amorficzny)
- Inne:
 - Arsenek galu GaAs
 - Tellurek kadmu CdTe

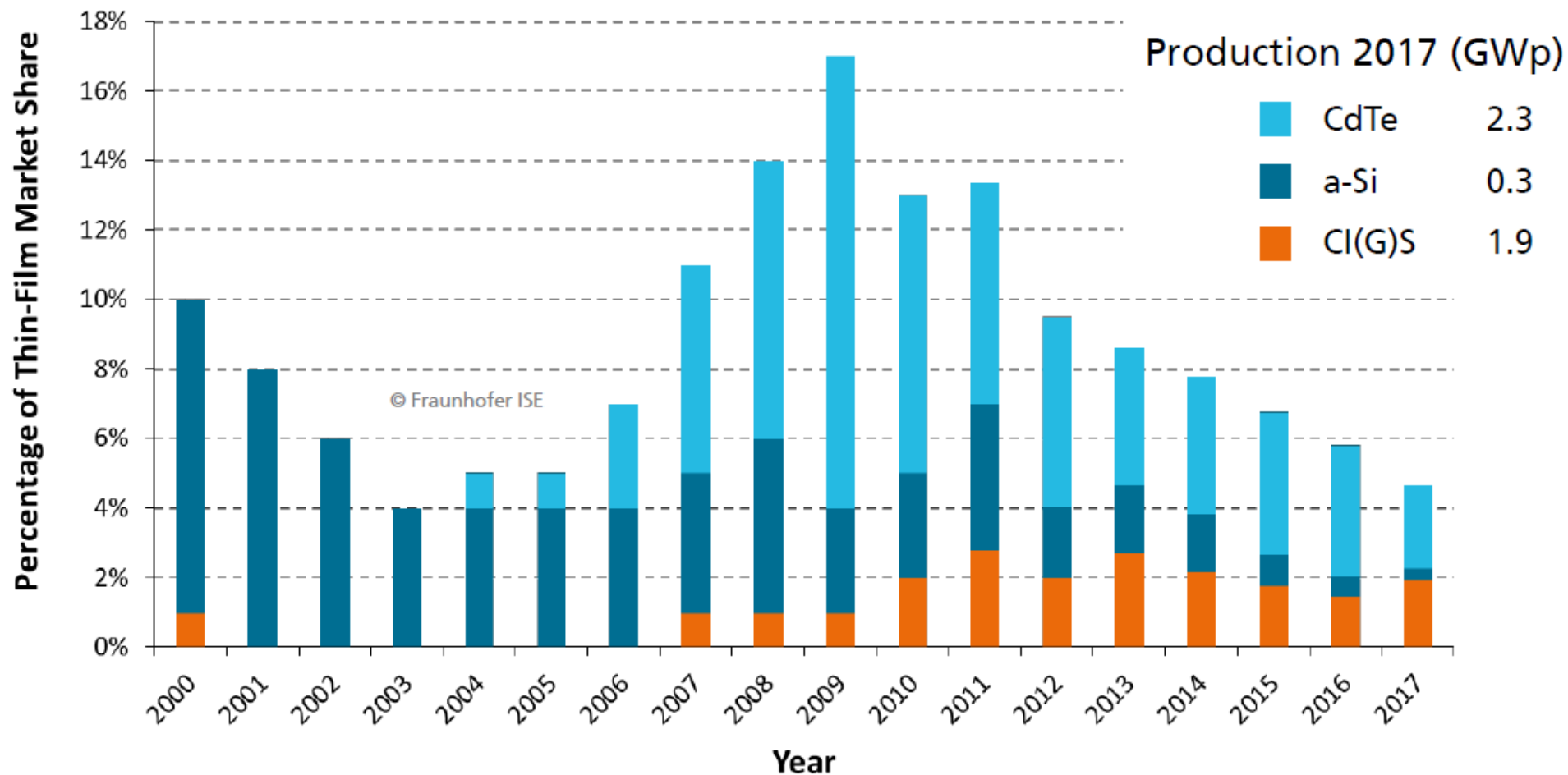
Si polikrystaliczny	62%
Si monokrystaliczny	33%
CdTe	2,4%
CuInSe₂ i pochodne	2%
Si amorficzny	0,3%
GaAs i inne III-V	0,3%

Materiał	E _g [eV]	η [%]
C-Si	1,15	25/23
A-Si:H	1,4-2,0	13,2
GaAs	1,4	27
Cu(In,Ga)Se₂	1,11	21,7/16
CdTe	1,50	22,1/16

Podział rynku PV na różne technologie

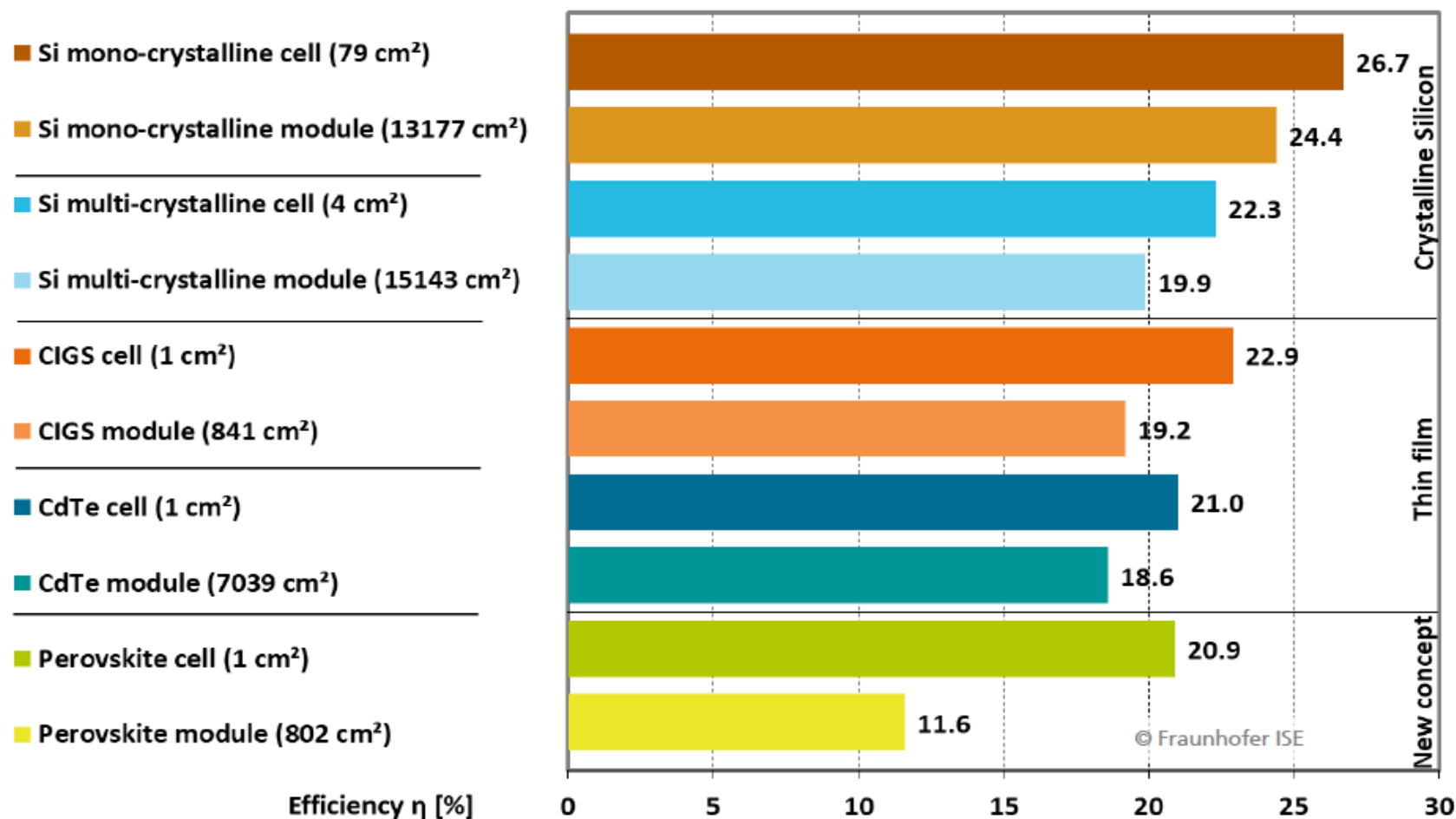


Udział w rynku PV różnych technologii cienkowarstwowych

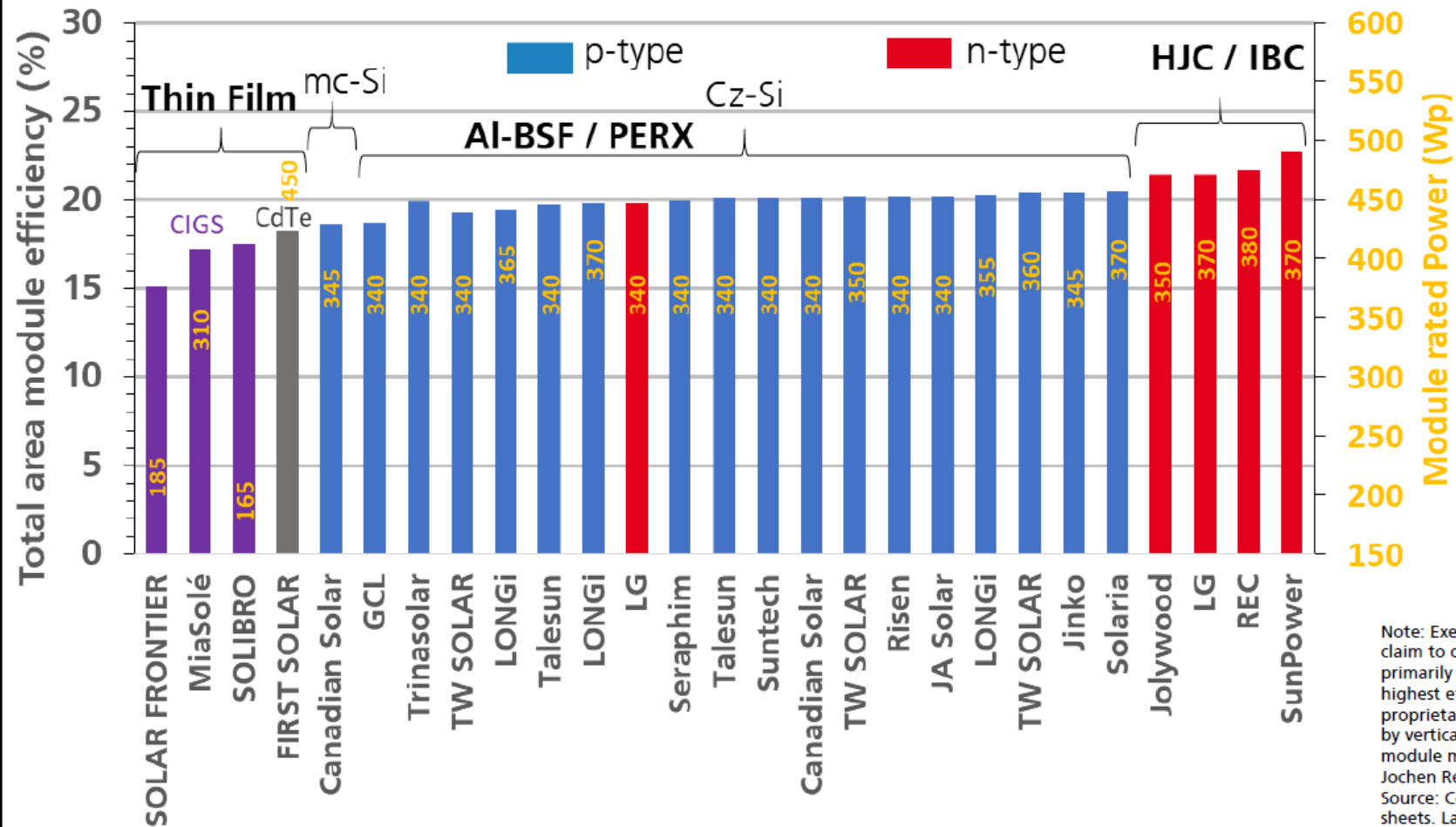


Data: from 2000 to 2010: Navigant; from 2011: IHS. Graph: PSE GmbH 2018

PV – sprawność laboratoryjna i produkcyjna (ogniwo-moduł)

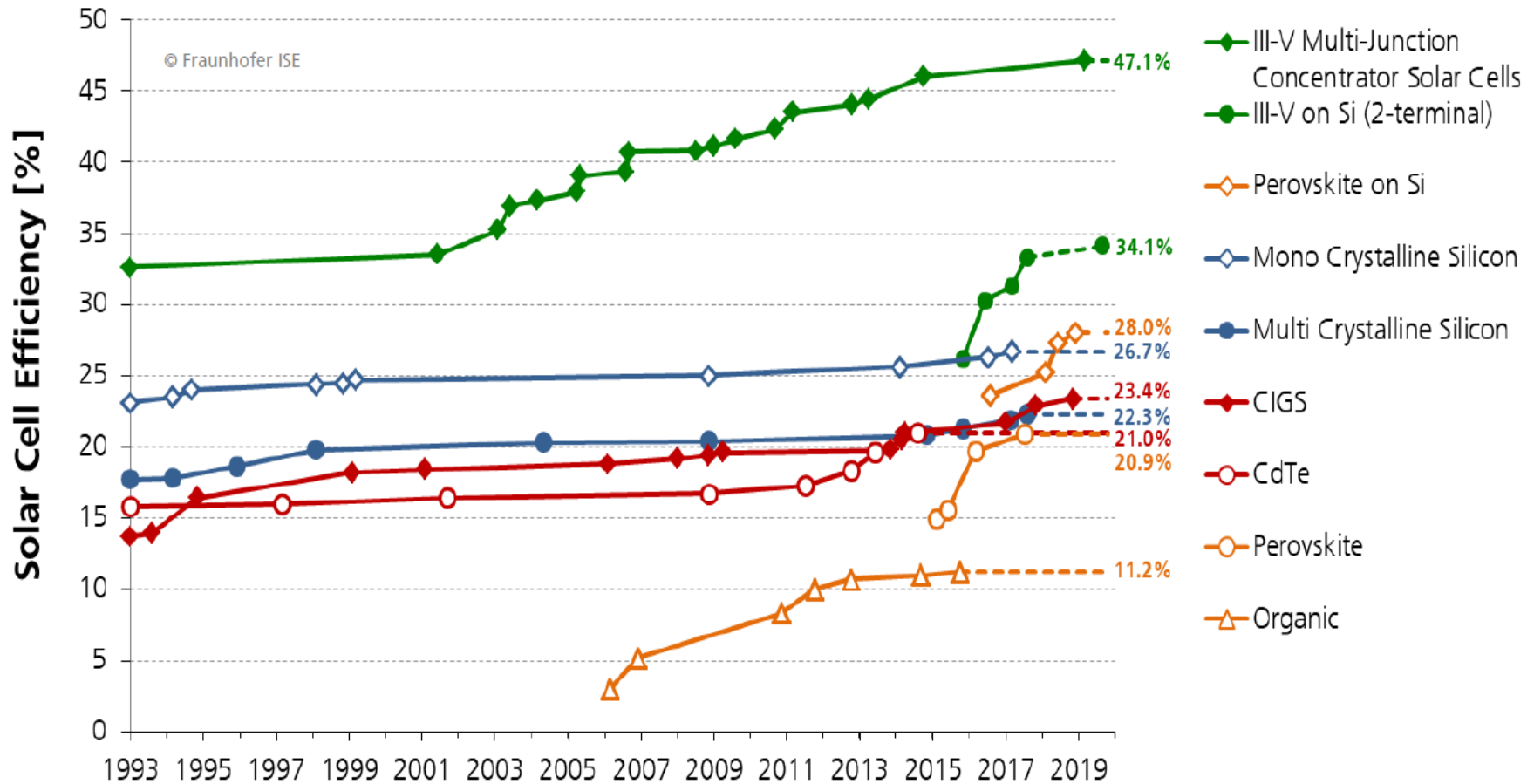


Przegląd parametrów modułów PV u różnych producentów



Note: Exemplary overview without claim to completeness; Selection is primarily based on modules with highest efficiency of their class and proprietary cell concepts produced by vertically integrated PV cell and module manufacturers; Graph: Jochen Rentsch, Fraunhofer ISE. Source: Company product data sheets. Last update: Nov. 2019.

Historyczny rozwój sprawności w poszczególnych technologiach

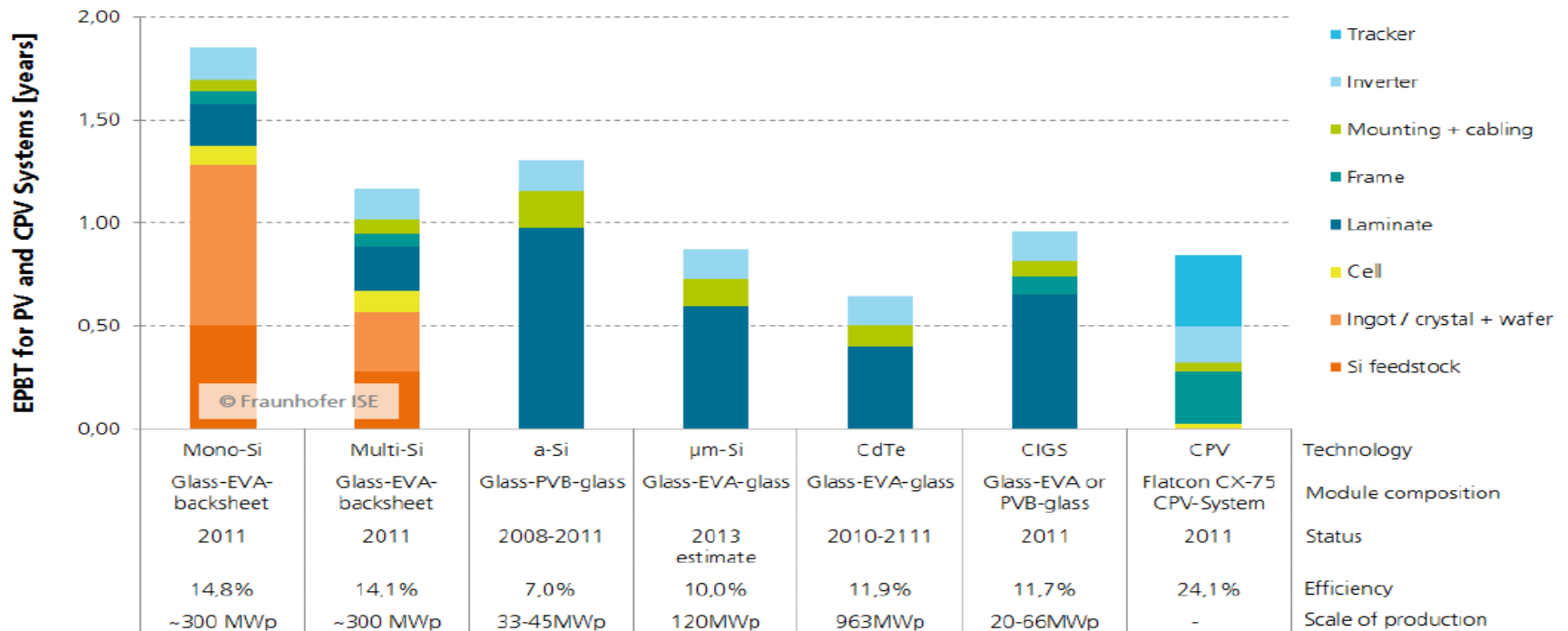


Data: Solar Cell Efficiency Tables (Versions 1 to 54), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1993-2019. Graph: Fraunhofer ISE 2019

Okres zwrotu energii (EPBT)

Energy Pay-Back Time for PV and CPV Systems Different Technologies located in Catania, Sicily, Italy

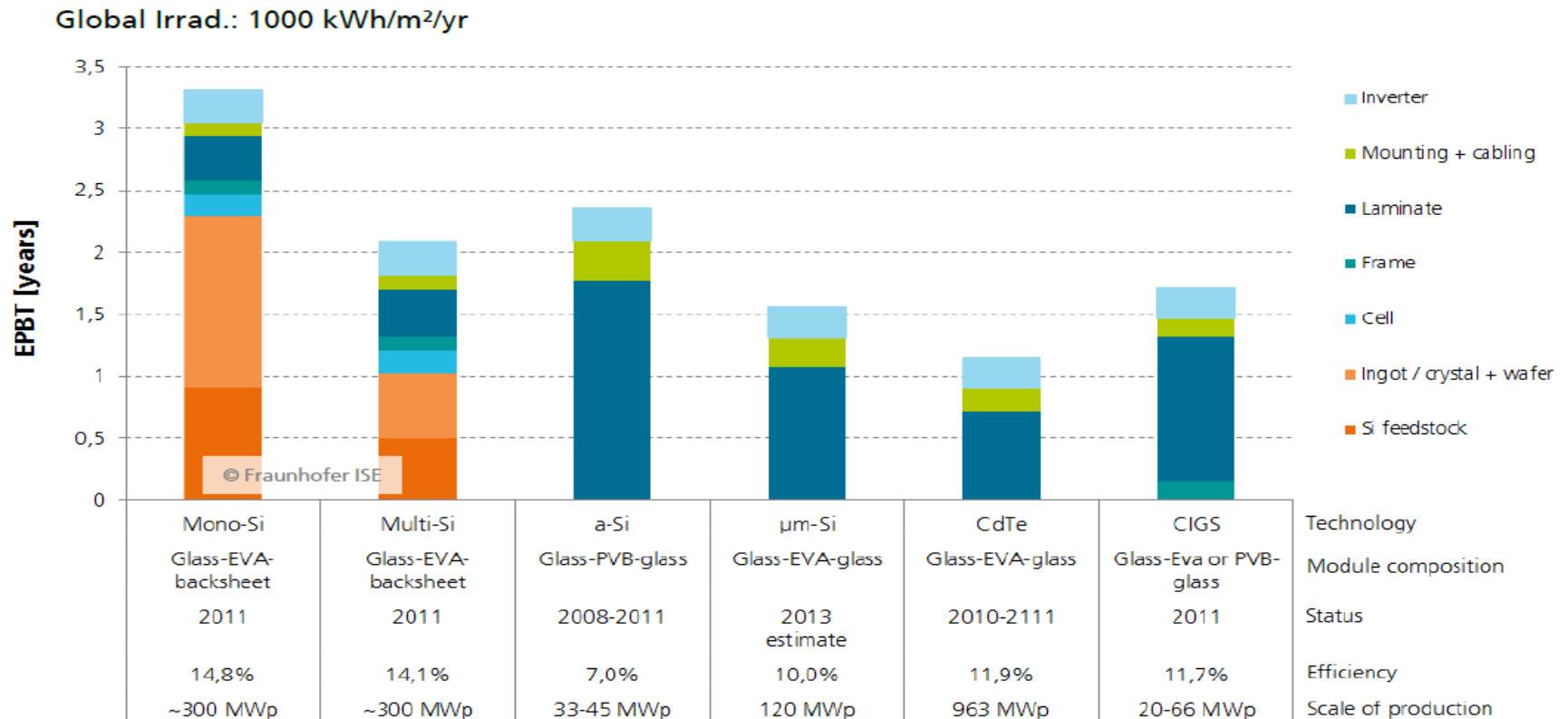
Global Irrad.: 1925 kWh/m²/yr, Direct Normal Irrad.: 1794 kWh/m²/yr



Data: M.J. de Wild-Scholten 2013; CPV data: "Environmental Sustainability of Concentrator PV Systems: Preliminary LCA Results of the Apollon Project" 5th World Conference on PV Energy Conversion. Valencia, Spain, 6-10 September 2010. Graph: PSE 2014

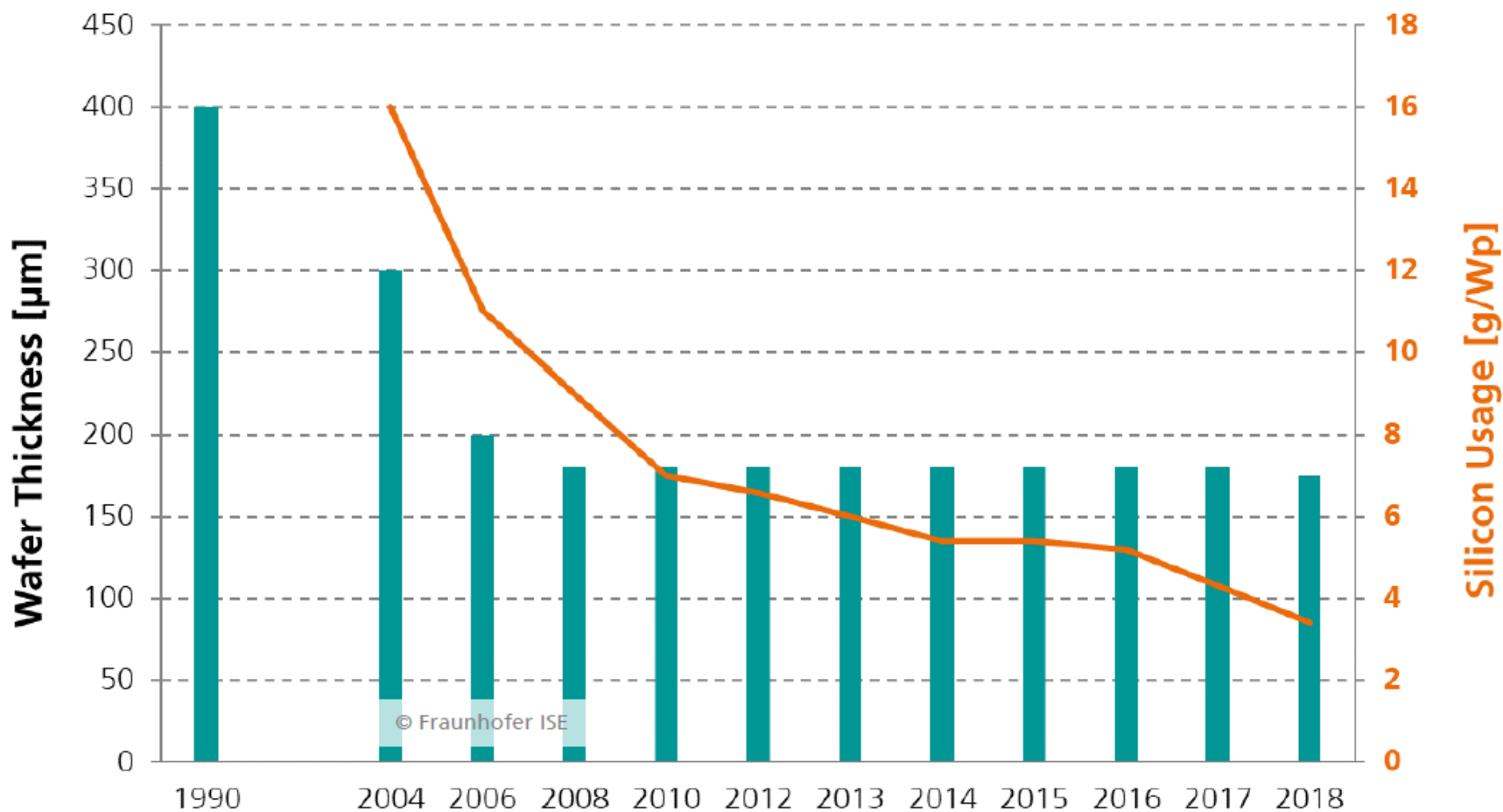
Okres zwrotu energii (EPBT)

Energy Pay-Back Time of Rooftop PV Systems Different Technologies located in Germany



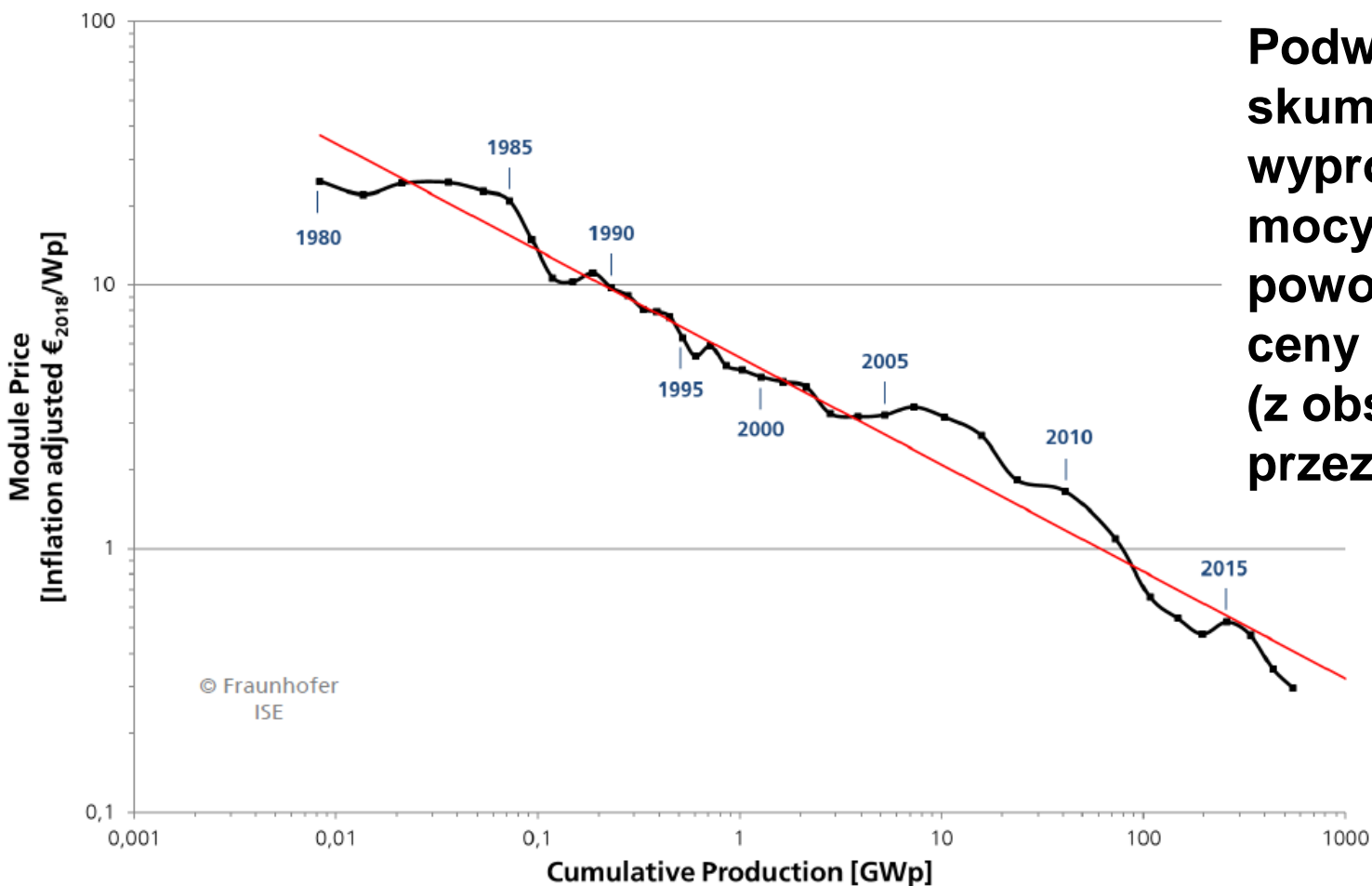
Data: M.J. de Wild-Scholten 2013; CPV data: "Environmental Sustainability of Concentrator PV Systems: Preliminary LCA Results of the Apollon Project" 5th World Conference on PV Energy Conversion. Valencia, Spain, 6-10 September 2010. Graph: PSE 2014

Zużycie krzemu przy produkcji ogniw PV



Data: until 2012: EU PV Technology Platform Strategic Research Agenda, from 2012: ITRPV 2015; ISE 2016 without; 2017 and 2018 with recycling of Si. Graph: PSE GmbH 2019

Koszty produkcji modułów PV



Podwojenie skumulowanej ilości wyprodukowanej mocy modułów PV powoduje spadek ich ceny o 24% (z obserwacji rynku przez 38 lat)

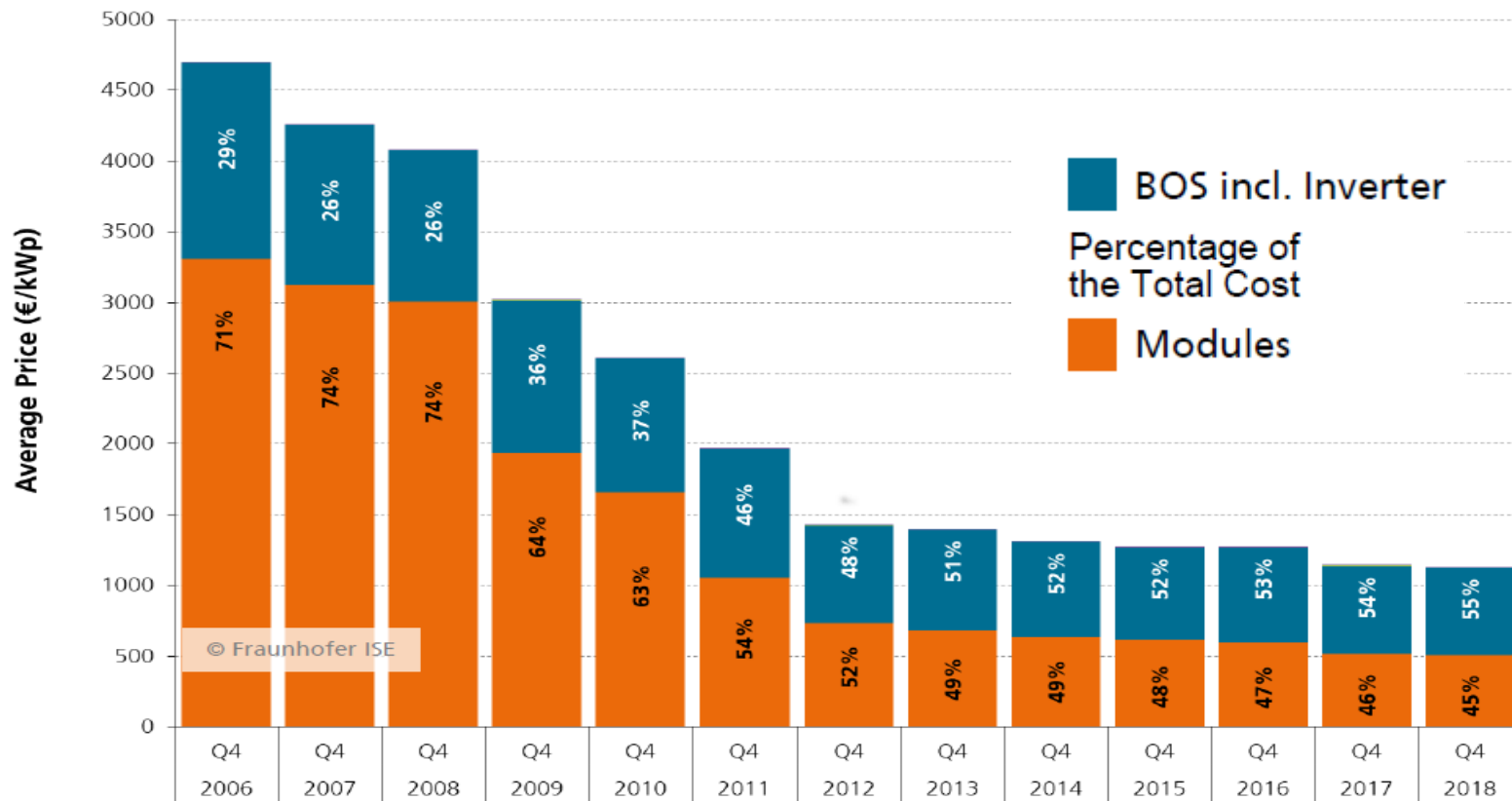
Data: from 1980 to 2010 estimation from different sources : Strategies Unlimited, Navigant Consulting, EUPD, pvXchange; from 2011: IHS. Graph: PSE GmbH 2019



AGH

Rozkład kosztów przy budowie systemu PV

(średnie ceny dla dachowych systemów PV o mocach 10-100kW na rynku niemieckim)

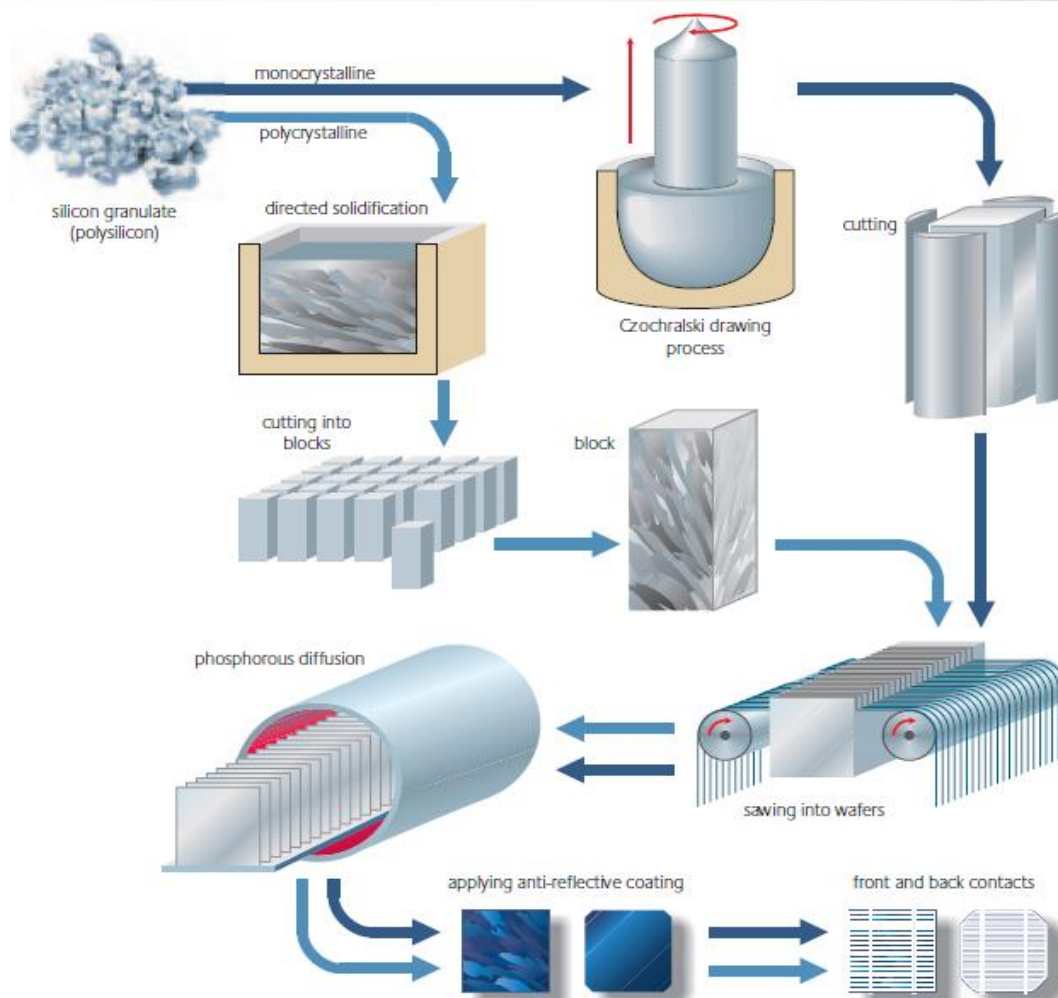


Data: BSW-Solar. Graph: PSE GmbH 2019

Produkcja monokrystalicznego fotoogniwa fotowoltaicznego

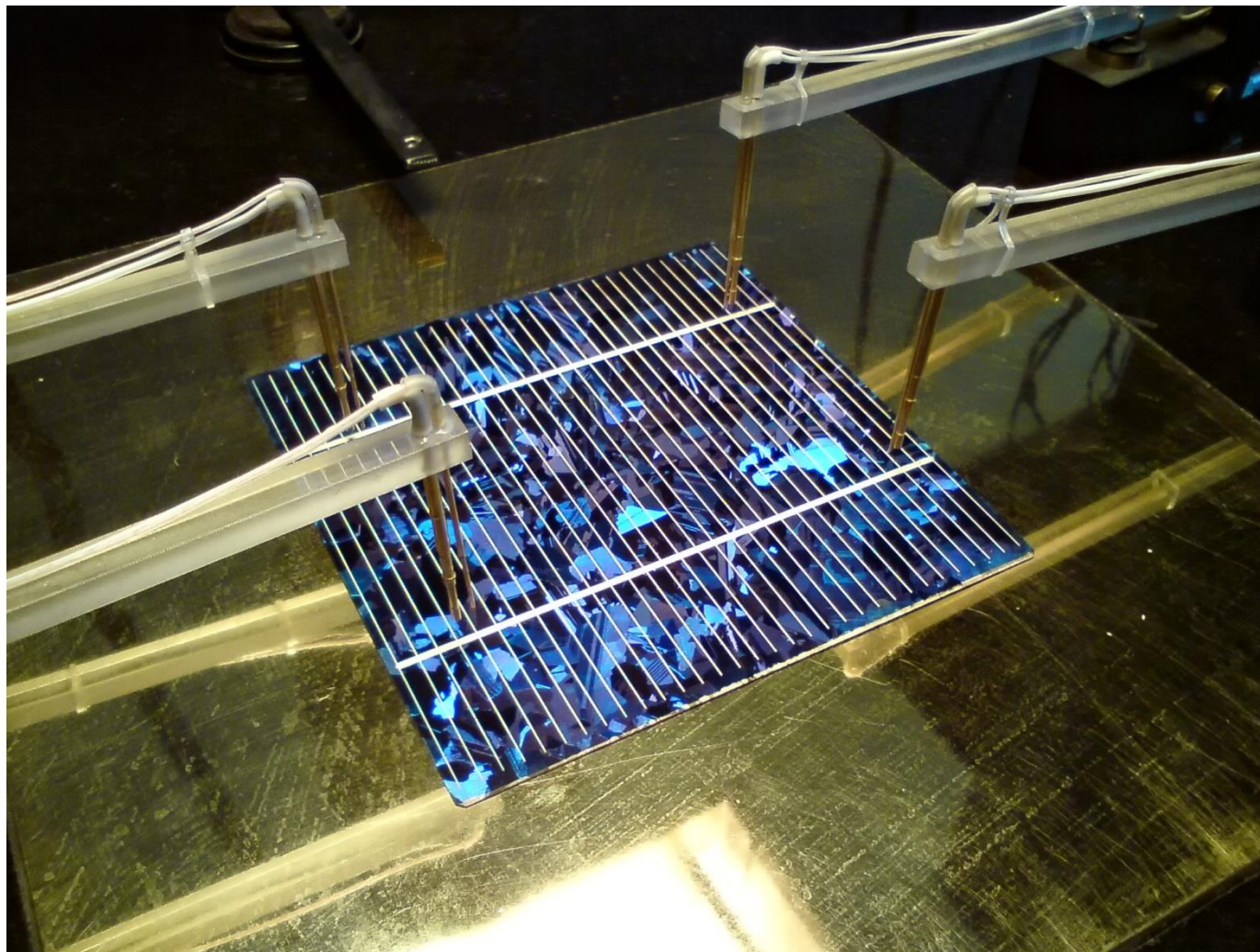
- Krzem metalurgiczny (stopiony do fazy ciekłej) domieszkowany np. borem (półprzewodnik typu P)
- Wyciąganie monokryształów (poprzez wkładanie zarodka monokryształu do fazy ciekłej) – metodą prof. Czochralskiego (1885-1953)
- Oczyszczanie walca monokryształu poprzez punktowe podgrzewanie i przesuwanie podgrzanego obszaru ku dołowi
- Wycinanie z walca prostopadłościanu (w rogach pozostają łuki – ślady po pierwotnym kształcie walca)
- Cięcie na płytki o grubości 0.15 do 0.2mm (wafle krzemowe)
- Teksturyzacja powierzchni (zmniejszenie odbicia światła)
- Dyfuzja fosforu (wytworzenie obszaru N a w konsekwencji złącza N-P)
- Nanoszenie warstwy antyodblaskowej i kontaktów elektrycznych

Fazy procesu produkcyjnego fotoogniwa słonecznego

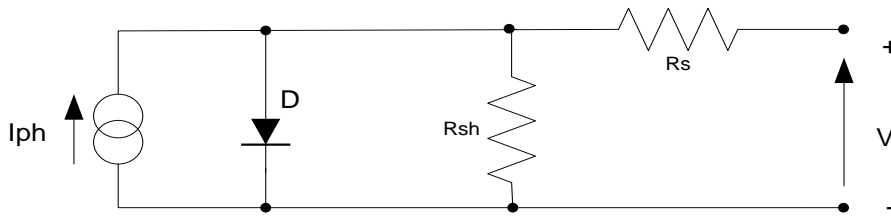


źródło : Marek Butkowski „Rynek technologii Słonecznych w Polsce”, prezentacja

Testowanie krzemowego polikrystalicznego ogniwa fotowoltaicznego na symulatorze Słońca



Model fizyczny ogniwa fotowoltaicznego



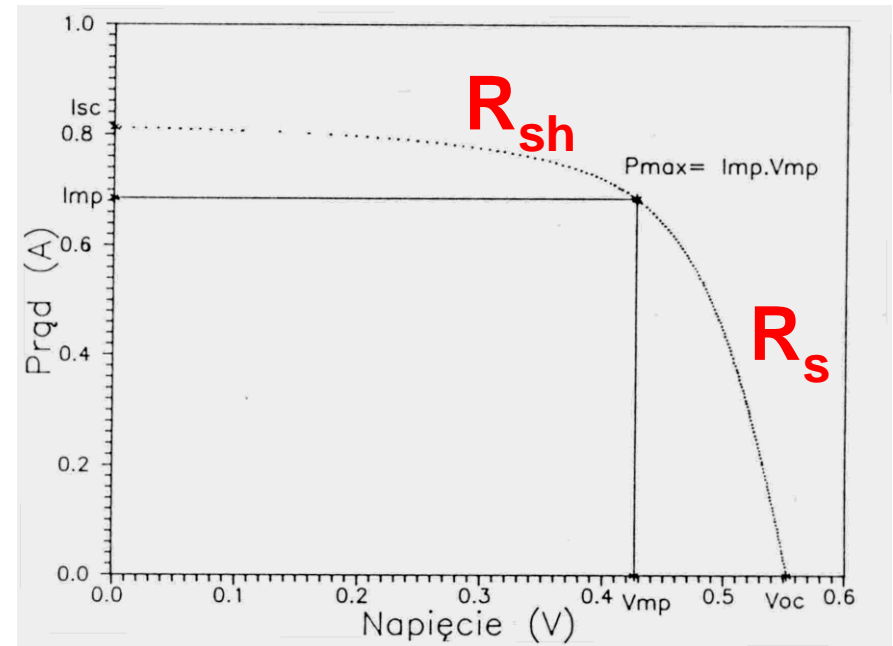
Gdzie:

D – symbolizuje złącze półprzewodnikowe

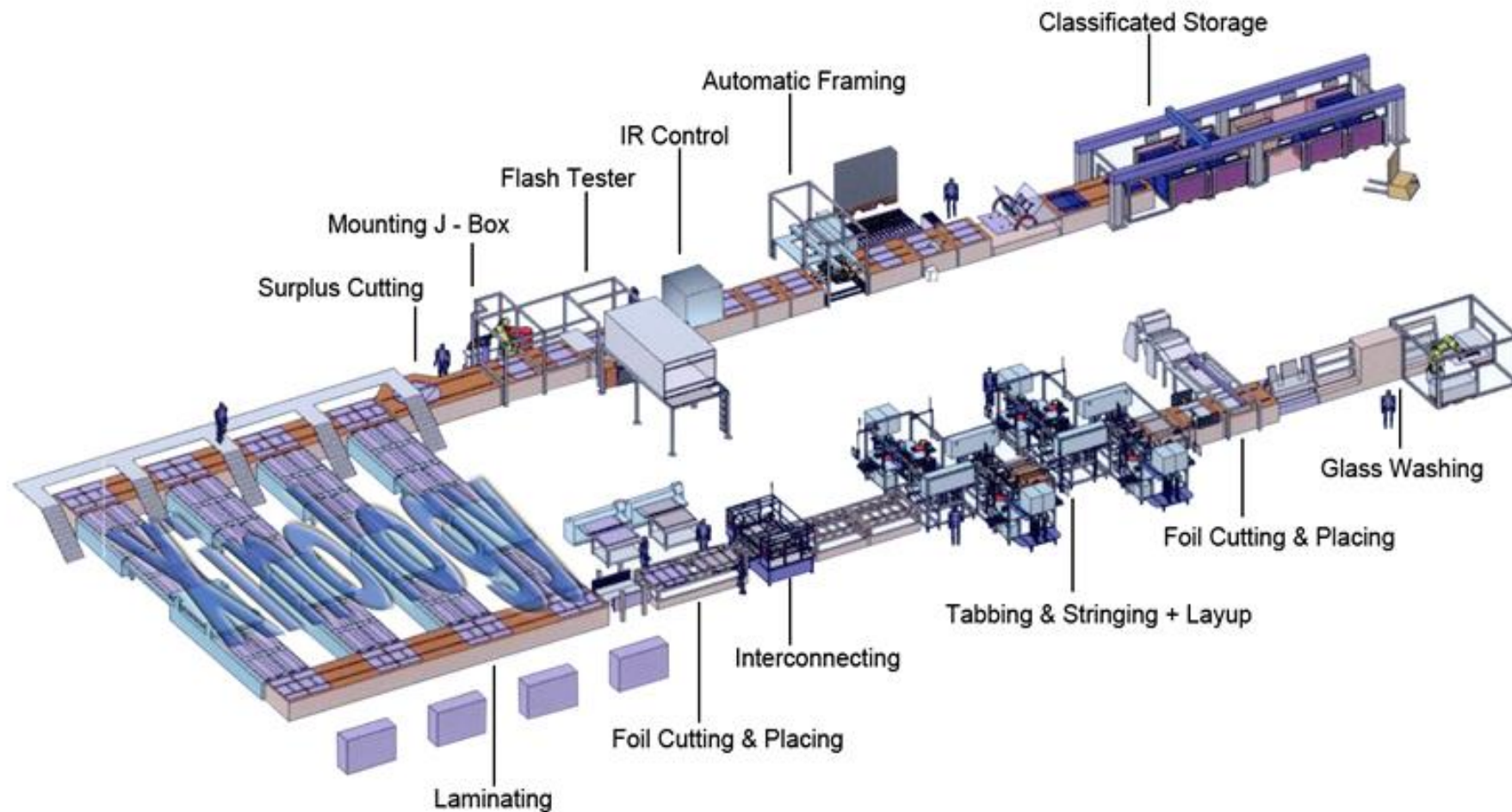
I_{ph} – oznacza fotoprąd generowany w złączu

R_{sh} – oznacza rezystancję upływności między elektrodami złącza (powinna mieć jak największą wartość)

R_s – oznacza rezystancję szeregową – czyli właściwie rezystancję kontaktów (powinna mieć jak najmniejszą wartość)

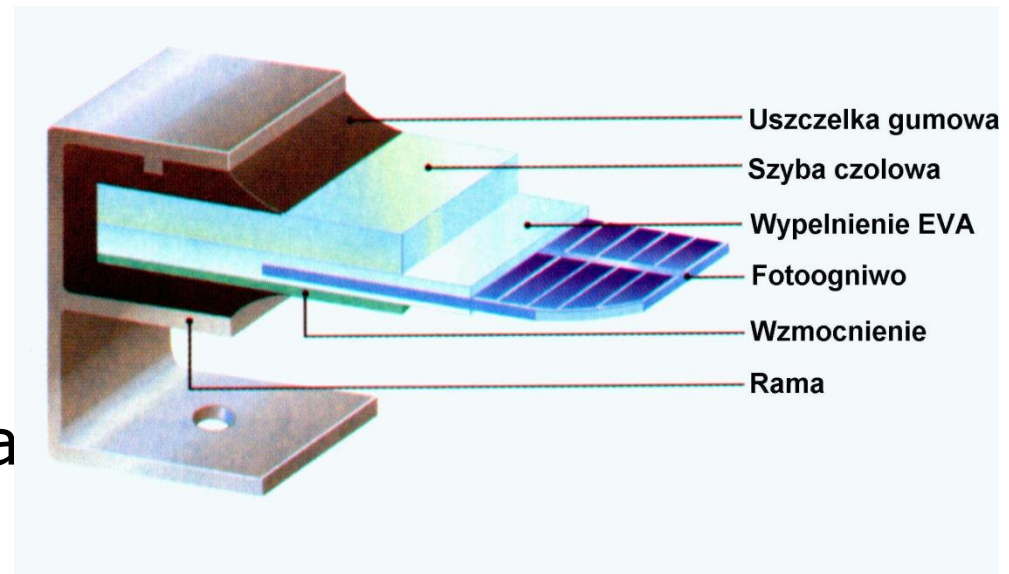


Schemat linii produkcyjnej



Przekrój modułu fotowoltaicznego

- Odpowiednie połączenie pojedynczych komórek fotowoltaicznych w szeregi
- Masa wypełniająca
- Szyba przednia
- Tworzywo tylne
- Rama wzmacniająca





Dziękuję za uwagę !!!

**To już jest koniec
Bo nie ma już nic
Jesteście wolni
Możecie iść...**

